

Rec'd PCT/PTO 30 DEC 2004

REC'D 15 AUG 2003

PCT/JP 03/08377

WIPO

PCT

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

01.07.03

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2002年 7月10日

出願番号
Application Number: 特願2002-200777
[ST. 10/C]: [JP 2002-200777]

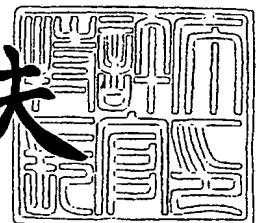
出願人
Applicant(s): ソニー株式会社

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年 8月 1日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2003-3061420

【書類名】 特許願

【整理番号】 0200054703

【提出日】 平成14年 7月10日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01L 21/027

【発明者】

【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社
内

【氏名】 菅原 稔

【特許出願人】

【識別番号】 000002185

【氏名又は名称】 ソニー株式会社

【代理人】

【識別番号】 100086298

【弁理士】

【氏名又は名称】 船橋 國則

【電話番号】 046-228-9850

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2002-193168

【出願日】 平成14年 7月 2日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 007364

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9904452

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 極短紫外光の位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 極短紫外光を反射して被露光体上に所望パターンを転写するために用いられる極短紫外光の位相シフトマスクであって、

極短紫外光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第 1 領域および第 2 領域とを具備するとともに、

前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、前記第 1 領域での極短紫外光の反射光と前記第 2 領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されている

ことを特徴とする極短紫外光の位相シフトマスク。

【請求項 2】 前記所定の位相差に加えて、前記第 1 領域での極短紫外光の反射率と前記第 2 領域での極短紫外光の反射率とが略等しくなるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が設定されている

ことを特徴とする請求項 1 記載の極短紫外光の位相シフトマスク。

【請求項 3】 前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜の膜厚が互いに略等しくなるように構成されている

ことを特徴とする請求項 1 記載の極短紫外光の位相シフトマスク。

【請求項 4】 前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜の両方またはいずれか一方は、複数の材料からなる積層構造を有している

ことを特徴とする請求項 1 記載の極短紫外光の位相シフトマスク。

【請求項 5】 極短紫外光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第 1 領域および第 2 領域とを具備してなる極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法であって、

前記極短紫外光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定し、

特定した位相および反射率に基づいて、前記第 1 領域での極短紫外光の反射光と前記第 2 領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定する

ことを特徴とする極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法。

【請求項 6】 前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜の各膜厚の選定にあたり、膜内多重干渉に起因する位相差および反射率の膜厚に対する変動を考慮する

ことを特徴とする請求項 5 記載の極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法。

【請求項 7】 選定した複素屈折率および膜厚を、複数の材料からなる積層構造によって実現される合成複素屈折率および合計膜厚によって得る

ことを特徴とする請求項 5 記載の極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法。

【請求項 8】 極短紫外光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写するリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法であって、

前記極短紫外光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定し、

特定した位相および反射率に基づいて、前記反射多層膜基板上の第 1 領域での極短紫外光の反射光と前記反射多層膜基板上の第 2 領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定し、

選定した複素屈折率および膜厚にて前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜をそれぞれ前記反射多層膜基板上に形成して、前記反射多層膜基板上に前記第 1 領域および前記第 2 領域を具備してなる極短紫外光の位相シフトマスクを構成し、

構成した極短紫外光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写する

ことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体装置の回路パターンを形成するためのリソグラフィ工程にて用いられる位相シフトマスクおよびその製造方法、並びにそのリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法に関し、特にいわゆる極短紫外光に対応した位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年、半導体装置の微細化に伴い、ウエハ上に形成される回路パターンやその回路パターンを形成するためのレジストパターン等に対しては、パターン幅（線幅）やパターン間のピッチ等の極小化が要求されている。このような極小化の要求については、レジストの露光に用いる紫外光の波長をより短波長にすることで対応が可能となる。例えば、350nmの設計ルール of 半導体装置には365nmの波長、250nmおよび180nmの設計ルール of 半導体装置には248nmの波長、130nmおよび100nmの設計ルール of 半導体装置には193nmの波長といったように、半導体装置の微細化が進むほど、露光に用いる紫外光の波長も短波長化され、さらには157nmの波長の紫外光が用いられるようになってきている。

【0003】

一般に、これらの波長による解像度は、 $w = k_1 \times (\lambda / NA)$ というレイリーの式で表されることが知られている。ここで、 w は解像される最小幅のパターン、 NA は投影光学系のレンズの開口数、 λ は露光光の波長である。また、 k_1 は、主にレジストの性能および超解像技術の選択等により決定されるプロセス定数であって、最適なレジストおよび超解像技術を用いれば $k_1 = 0.35$ 程度まで選択できることが知られている。なお、超解像技術とは、マスクを透過し、マスク上遮光パターンで回折された光の ± 1 次回折光を選択的に用いることにより、波長よりも小さなパターンを得ようとするものである。

【0004】

このレイリーの式によれば、例えば157nmの波長を用いた場合に対応が可能な最小のパターン幅は、 $NA = 0.9$ のレンズを用いるとすれば、 $w = 61\text{nm}$ となるこ

とがわかる。すなわち、61nmよりも小さなパターン幅を得るためには、157nmよりもさらに短波長の紫外光を用いる必要がある。

【0005】

このことから、最近では、157nmよりも短波長の紫外光として、極短紫外光（EUV; Extreme Ultra Violet）と呼ばれる13.5nmの波長のものを用いることも検討されている。ただし、157nmの波長の紫外光までは、例えばCaF₂（フッ化カルシウム）やSiO₂（二酸化ケイ素）といった光透過性のある材料が存在するため、当該紫外光を透過させる構成のマスクおよび光学系を作製することができる。ところが、13.5nmの波長の極短紫外光については、当該極短紫外光を所望の厚さでもって透過させる材料が存在していない。そのため、13.5nmの波長の極短紫外光を用いる場合には、光透過型のマスクおよび光学系ではなく、光を反射する反射型マスクおよび反射型光学系によって、マスクおよび光学系を構成する必要がある。

【0006】

反射型マスクを用いた場合には、マスク面で反射された光が、そのマスクに入射される光と相互に干渉することなく、投影光学系に導かれねばならない。そのため、マスクに入射される光は、必然的にマスク面の法線に対して角度 ϕ を持った斜め入射となる必要が生じる。この角度は、投影光学系のレンズの開口数NA、マスク倍率m、照明光源の大きさ σ から決まる。具体的には、例えばウエハ上に5倍の縮小倍率を持つマスクを用いた場合、 $NA=0.3$ 、 $\sigma=0.8$ の露光装置においては、光が $3.44 \pm 2.75^\circ$ の立体角を持ってマスク上に入射することになる。また、ウエハ上に4倍の縮小倍率を持つマスクを用いた場合、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.7$ の露光装置においては、光が $3.58 \pm 2.51^\circ$ の立体角を持ってマスク上に入射することになる。これらの立体角を考慮して、マスクに入射する露光光の入射角度は、通常 5° 近傍になるように設定される。ここで、入射角度は、マスク表面に対する法線となす角度として定義される。

【0007】

このような反射型マスクにより13.5nmの波長の極短紫外光を反射する場合、例えば $NA=0.25$ の露光装置においては、上述したレイリーの式から $k_1 \geq 0.6$ の

条件であれば、32.4nmの線幅を形成することができるようになる。すなわち、極短紫外光とその極短紫外光でのパターン転写を可能とする反射型マスクを用いることで、光透過型のマスクおよび光学系では達成できなかったパターン幅やパターンピッチ等の極小化にも対応可能となるのである。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、近年では、微細化に対する要望が急速に進んでおり、パターン幅やパターンピッチ等の更なる極小化への対応が望まれている。例えば、特に小さなサイズの要求されるゲート線幅においては、32.4nmよりも小さなサイズの線幅、すなわち $k_1 < 0.6$ となる条件も要求されるようになってきている。具体的には、加工後ゲート線幅が15nmで、レジスト上線幅においても25nm線幅が要求されるに至っている。この25nmのレジスト線幅については、波長13.5nmで $NA = 0.25$ の露光装置の場合に、レイリーの式から $k_1 = 0.46$ となる。このようなサイズの線幅を形成する場合には、単に13.5nmの波長の極短紫外光とこれを反射する反射型マスクとを用いるだけではなく、超解像技術を用いることが必要とされる。

【0009】

超解像技術としては、マスクパターンの±1次回折光を選択的に利用する①変形照明光源（輪帯照明や4つ穴照明等）や②瞳フィルター（輪帯フィルターや4つ穴フィルター等）の他に、③ハーフトーン型位相シフトマスク、④ハーフトーン型位相シフトマスクと変形照明光源の組み合わせ、または⑤レベンソン型位相シフトマスク（または「オルタネーティング位相シフトマスク」ともいう）を用いることが知られている。③、④および⑤（以下、ハーフトーン型位相シフトマスクおよびレベンソン型位相シフトマスクを「位相シフトマスク」と総称する）は、いずれも光の位相差を利用したものであり、解像性能を向上させ、またパターンコントラストを増大させる上で非常に有効であることから、リソグラフィ工程では①または②に比べて多く用いられている。

【0010】

しかしながら、光を透過させる透過型マスクであれば、周知のように位相シフトマスクを構成することは容易であるが、極短紫外光に対応する反射型マスクの

場合には、位相シフトマスクを構成することが非常に困難である。例えば、透過型マスクであればマスク基板を掘り込むことで光の位相差が互いに 180° 異なる領域を形成することができるが、これをそのまま反射型マスクに適用しても、マスク基板を掘り込むことで光の反射率も同時に変化してしまうため、位相シフトマスクを構成することはできない。また、透過型マスクであれば材料の位相シフト効果を利用することで光の位相差が互いに 180° 異なる領域を形成することができるが、これを反射型マスクに適用しても、極短紫外光の露光波長に対して吸収の無い材料は存在せず、単一材料では所望の反射率と位相シフト効果を奏する構成が得られないため、位相シフトマスクを構成することができない。さらには、極短紫外光の反射型マスクに用いられる反射多層膜基板はSi（ケイ素）層とMo（モリブデン）層を交互に積層した構造（例えば40層の繰り返し）のものが一般的であることから、その積層順序が相互に逆になっている領域を別々に形成することで位相差が 180° で反射率が互いに等しい領域を構成することも提案されているが、そのような積層構造を作製することは甚だ困難であり未だそのような積層構造の位相シフトマスクは実用化されていない。これらのことから、極短紫外光に対応した反射型の位相シフトマスクについては、これを現実構成することは不可能であると考えられてきた。

【0011】

そこで、本発明は、極短紫外光の波長に対してはマスク用材料として適している材料の屈折率が0.89から1.01の間に存在していることを鑑み、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、現実構成することのできる極短紫外光の位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法を提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】

本発明は、上記目的を達成するために案出された極短紫外光の位相シフトマスクで、極短紫外光を反射して被露光体上に所望パターンを転写するために用いられる極短紫外光の位相シフトマスクであって、極短紫外光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備す

るとともに、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、前記第1領域での極短紫外光の反射光と前記第2領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されていることを特徴とするものである。

【0013】

また、本発明は、上記目的を達成するために案出された極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法で、極短紫外光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備してなる極短紫外光の位相シフトマスクの製造方法であって、前記極短紫外光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定し、特定した位相および反射率に基づいて、前記第1領域での極短紫外光の反射光と前記第2領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定することを特徴とする。

【0014】

また、本発明は、上記目的を達成するために案出された半導体装置の製造方法で、極短紫外光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写するリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法であって、前記極短紫外光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定し、特定した位相および反射率に基づいて、前記反射多層膜基板上の第1領域での極短紫外光の反射光と前記反射多層膜基板上の第2領域での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定し、選定した複素屈折率および膜厚にて前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜をそれぞれ前記反射多層膜基板上に形成して、前記反射多層膜基板上に前記第1領域および前記第2領域を具備してなる極短紫外光の位相シフトマスクを構成し、構成した極短紫外光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パタ

ーンを転写することを特徴とする。

【0015】

上記構成の極短紫外光の位相シフトマスク、上記手順の位相シフトマスクの製造方法、および上記手順の半導体装置の製造方法では、反射多層膜基板上に形成される第1領域および第2領域について、極短紫外光の反射光に所定の位相差が生じるように、それぞれの膜厚および複素屈折率が設定されている。すなわち、設定された膜厚となるように第1領域の形成膜および第2領域の形成膜が成膜され、設定された複素屈折率となるように第1領域の形成膜および第2領域の形成膜の形成材料が選択されている。設定された複素屈折率とするには、各形成膜を、複数の材料からなる積層構造とすることで達成できる。このように、第1領域の形成膜および第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を設定値に合わせることで、第1領域と第2領域とで極短紫外光の反射光に所定（例えば180°）の位相差が生じる。

【0016】

【発明の実施の形態】

以下、図面に基づき本発明に係る極短紫外光の位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法について説明する。なお、当然のことではあるが、本発明は、以下に述べる実施の形態に限定されるものではない。

【0017】

〔位相シフトマスクの概略構成の説明〕

先ず、本発明に係る極短紫外光の位相シフトマスクの概略構成について説明する。ここで説明する位相シフトマスクは、半導体装置の製造方法における一工程であるリソグラフィ工程にて、極短紫外光を反射してウエハ等の被露光体上に所望パターン（例えば回路パターン）を転写するために用いられるものである。なお、ここで言う「極短紫外光」には、例えば波長が13.5nmのものに代表されるように、従前のリソグラフィ工程で用いられていた紫外光よりも短波長（例えば、1nm以上100nm以下）のものが該当する。

【0018】

図1は、本発明に係る位相シフトマスクの概略構成の一例を示す模式図である

。図例のように、位相シフトマスク 10, 10' は、極短紫外光を反射する反射多層膜基板（マスクブランクス） 11 と、その反射多層膜基板 11 上に形成された第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b とを具備したものである。

【0019】

反射多層膜基板 11 は、例えば Si（ケイ素）層と Mo（モリブデン）層とを交互に積層した構造で構成されるが、その積層の繰り返し数が 40 層であるものが一般的である。また、Si 層および Mo 層の合計の厚さと Mo 層の厚さとの比 Γ は、 $\text{Mo 層厚} / (\text{Si 層厚} + \text{Mo 層厚}) = 0.4$ が適切であることが知られている。したがって、反射多層膜基板 11 では、露光に用いる極短紫外光の波長 λ を 13.5nm とすると、Si 層と Mo 層の合計の膜厚が $(\lambda / 2) / (0.9993 \times 0.6 + 0.9211 \times 0.4) = 6.973\text{nm}$ 、Si 層の厚さが $6.9730 \times 0.6 = 4.184\text{nm}$ 、Mo 層の厚さが $6.9730 \times 0.4 = 2.789\text{nm}$ となる。

【0020】

この反射多層膜基板 11 上には、バッファ膜 13 を介して吸収膜 14 が形成されている。バッファ膜 13 は、吸収膜を形成する際のエッチングストッパとして、あるいは吸収膜形成後の欠陥除去時のダメージ回避を目的として設けられているもので、例えば Ru（ルテニウム）層や SiO₂（二酸化ケイ素）によって構成される。吸収膜 14 は、極短紫外光を吸収する材料からなるもので、例えば TaN（タンタルナイトライド）層によって構成される。ただし、吸収膜 14 は、極短紫外光のマスク用材料として用いることのできるものであれば、他の材料からなるものであってもよい。具体的には、TaN 以外に Ta（タンタル）または Ta 化合物、Cr（クロム）または Cr 化合物、W（タングステン）または W 化合物等が考えられる。

【0021】

ところで、反射多層膜基板 11 上には、第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b が形成されている。第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b とでは、それぞれでの極短紫外光の反射光に、所定（例えば 180°）の位相差が生じるようになっている。そのために、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b とでは、後述するように、それぞれにおける形成膜（バッファ膜 13 + 吸収膜 14）の構成材料またはその膜厚が

異なる（図 1（a）参照）。ただし、いずれか一方の領域のみにバッファ膜 13 および吸収膜 14 を形成することによって、各領域 12 a, 12 b に位相差が生じるようにしたものであってもよい（図 1（b）参照）。

【0022】

第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b との位相差 ψ は、第 1 領域 12 a における入射光と反射光の位相差を ϕ_1 、第 2 領域 12 b における入射光と反射光の位相差を ϕ_2 、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b との膜厚の差を h とすると、以下に示す（1）式によって特定することができる。

【0023】

【数 1】

$$\psi(\lambda) = \phi_1(\lambda) - \phi_2(\lambda) + (4\pi h \cos \theta) / \lambda \quad \cdots (1)$$

【0024】

この（1）式において、 θ は、マスクに入射する光がマスク面上法線に対してなす角度である。 λ は露光中心波長である。 ϕ_1 および ϕ_2 は、例えば “Yamamoto and T.Namioka” “Layer-by-layer design method for soft-x-ray multilayers”, Applied Optics, Vol.31 pp1622-1630, (1992) で開示されている方法で求めればよい。

【0025】

また、（1）式を用いて位相差 $\psi(\lambda)$ を求めるためには、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の形成材料の複素屈折率が必要である。極短紫外光の露光中心波長が 13.5nm である場合において、形成材料の複素屈折率は、例えば Mo : 0.92108-0.00643543i、Si : 0.9993-0.00182645i、Ru : 0.88749-0.0174721i、Ta : 0.94136-0.0315738i となる。形成材料が任意の m 層の積層構造で構成されている場合には、以下に示す（2）式および（3）式によって得られる合成複素屈折率を用いればよい。

【0026】

【数 2】

$$n = \sum_1^m n_m d_m / \sum_1^m d_m \quad \cdots (2)$$

【0027】

【数 3】

$$k = \sum_1^m k_m d_m / \sum_1^m d_m \quad \cdots (3)$$

【0028】

このようにして特定される位相差 ψ が第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b とで所定値（例えば 180° ）となるように、位相シフトマスク 10, 10' では、第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b における形成膜（バッファ膜 13 + 吸収膜 14）の構成材料（特に複素屈折率）およびその膜厚が設定されているのである。つまり、本実施形態で説明する位相シフトマスク 10, 10' は、第 1 領域 12 a の形成膜および第 2 領域 12 b の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、第 1 領域 12 a での極短紫外光の反射光と第 2 領域 12 b での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されている点に、大きな特徴がある。

【0029】

〔位相シフトマスクの製造手順の説明〕

次に、以上のような特徴を持つ位相シフトマスク 10, 10' について、その製造手順を説明する。ただし、ここでは、その製造手順を第 1 の実施の形態と第 2 の実施の形態とに分けて説明する。

【0030】

〔第 1 の実施の形態〕

第 1 の実施の形態では、本発明を適用してハーフトーン型位相シフトマスクを構成する場合を例に挙げて説明する。図 2 は、第 1 の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

【0031】

ハーフトーン型位相シフトマスクの製造にあたっては、まず、各複素屈折率に

対する等位相線および等反射率線を求める（ステップ101、以下ステップを「S」と略す）。これら等位相線および等反射率線は、既存の材料に限定することなく、任意の複素屈折率に対して求めておく。つまり、極短紫外光に対する任意の複素屈折率について、その複素屈折率から得られる極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定する。なお、複素屈折率に対する位相および反射率は、理論的に一意的に特定することができる。また、任意の複素屈折率には、反射多層膜基板11の複素屈折率も含むものとする。すなわち、等位相線および等反射率線は、反射多層膜基板11に対しても求めておく。

【0032】

図3は、等位相線の一具体例を示す説明図である。図例の等位相線は、複素屈折率の虚部（ k ）を0.0100iに固定して求めている。また、図4は、等反射率線の一具体例を示す説明図である。図例の等反射率線は、複素屈折率の実部（ n ）を0.9100に固定して求めている。なお、これらの等位相線および等反射率線において、（1）式の λ で表される露光波長は13.5nmであり、 θ で表されるマスク上への斜め入射光の入射角度は4.84°である。

【0033】

反射率および位相は複素屈折率の実部および複素屈折率の虚部それぞれに依存するが、位相は主に複素屈折率の実部に依存し、反射率は主に複素屈折率の虚部に依存する。したがって、最終的に第1領域12aと第2領域12bとで180°の位相差および所望の反射率を得るためには、近似的にこれら図3の等位相線および図4の等反射率線を用いて、各領域12a、12bの構成材料の複素屈折率または膜厚を設定すればよい。あるいは、複素屈折率および膜厚の両方を設定するようにしてもよい。

【0034】

複素屈折率または膜厚の設定にあたっては、まず、反射多層膜基板11上の第1領域12aおよび第2領域12bに加工可能な材料および膜構成を求める（S102）。そして、第1領域12aの材料構成における複素屈折率と、第2領域12bの材料構成における複素屈折率とを、それぞれ求める（S103、S104）。

【0035】

ここで、例えば図1 (b) に示した構成のハーフトーン型位相シフトマスク 10'、すなわち第2領域12bにのみバッファ膜13を介して吸収膜14が形成され、第1領域12aと第2領域12bとで 180° の位相差が生じる位相シフトマスクを構成する場合を考える。このとき、第1領域12aと第2領域12bとでは、それぞれ所望の反射率(互いに異なる値)が得られるものとする。また、第2領域12bでは、バッファ膜13の構成材料としてRuを、吸収膜14の構成材料としてTa₂N₅を、それぞれ選択しているものとする。

【0036】

図5は、Ru膜厚とTa₂N₅膜厚に対する複素屈折率の実部の分布を示す説明図である。図例からは、Ru膜厚が1nmから20nmおよびTa₂N₅膜厚が1nmから50nmの間において、合成複素屈折率の実部が0.890から0.945の間の値を取り得ることがわかる。つまり、図5の内容から、第2領域12bの材料構成における複素屈折率がわかることになる。なお、第1領域12aについては、バッファ膜13および吸収膜14が形成されていないので、反射多層膜基板11の積層構造から複素屈折率を求めればよい。

【0037】

それぞれの複素屈折率を求めた後は、その第1領域12aにおける屈折率および第2領域12bにおける屈折率と、既に求めている等位相線とから、第1領域12aと第2領域12bとの形成膜の段差、すなわち第2領域12bの形成膜の膜厚を求める(S105)。具体的には、図5の複素屈折率分布および図3の等位相線図を基にすれば、反射多層膜基板11との位相差が 180° となるための形成膜(バッファ膜13+吸収膜14)のトータル膜厚と合成複素屈折率の実部(n)との関係が、図6に示すように一意的に求まる。また、反射多層膜基板11との位相差が 180° となるためのRu層(バッファ膜13)とTa₂N₅層(吸収膜14)のそれぞれの膜厚は、合成複素屈折率が位相差 180° を与える条件から、図7に示すように一意的に求まる。これらのようにして、第2領域12bの形成膜の膜厚、すなわちRu層およびTa₂N₅層の膜厚を求めればよい。

【0038】

Ru層およびTa₂N層のそれぞれの膜厚が求まると、次いで、第1領域12aの形成膜と第2領域12bにおける極短紫外光の反射率を求める(S106)。反射率は、Ru層およびTa₂N層の各膜厚からトータル膜厚に対する合成複素屈折率の虚部(k)を求め、その合成複素屈折率の虚部から反射率を求めればよい。図8は、Ru層およびTa₂N層の各膜厚と、トータル膜厚に対する合成複素屈折率の虚部(k)との関係を示す説明図である。また、複素屈折率の虚部(k)がわかれば、反射率は、図4に示した等反射率線から一意的に求まる。図6には、合成複素屈折率虚部(k)および反射率とトータル膜厚との関係をも併せて示している。

【0039】

ここで、例えば、反射率を0.075に設定する場合は、図6の内容からトータル膜厚43nmであり、このとき図7の内容からRu層の膜厚14nmおよびTa₂N層の膜厚29nmが最も近い条件として得られる。この膜厚において、以下に述べるように、さらに合成複素屈折率の正確な値を用いて位相差および反射率を求めることで、位相差182.4° および反射率0.075のハーフトーン型位相シフトが得られるようになる。

【0040】

ただし、図6の内容によれば、反射率を0.075に設定する場合の膜厚条件は、トータル膜厚が46.3nmおよび48.3nm近傍にも存在していることがわかる。つまり、トータル膜厚は、複素屈折率から単一の条件として定まるものではないので、以下に述べる膜厚調整を含めて様々な条件を総合的に勘案してように定めるようにすればよい。このとき、マスク製造における膜厚ばらつきに対する複素屈折率に対するプロセス余裕度を大きく確保するためには、図中においてトータル膜厚の変化が平坦な部分(例えば50.5nm付近)に設定することが望ましい。このようにすれば、±1.5nm程度の範囲でトータル膜厚がばらついても、複素屈折率は変化しないので、位相差および反射率も変化しないからである。

【0041】

その後は、第1領域12aと第2領域12bとで180°の位相および所望の反射率が得られるように、さらに膜厚の調整を行う(S107, S108)。ここ

で膜厚の調整を行う更なる理由は、図6で考慮していない膜内多重干渉効果も含めて所望の位相および反射率を得るためである。具体的には、Ru層の膜厚とTa₂N層の膜厚をそれぞれ適宜変化させた場合の各位相差と各ハーフトーン反射率を、上述したような手順で求める。図9は、Ru層の膜厚とTa₂N層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。ここで、ハーフトーン反射率とは、図1(b)の位相シフトマスク10'において、第1領域12aの反射率と第2領域12bの反射率との差である。そして、これらの結果から、所望の位相差とハーフトーン反射率を満たすウィンドウ、すなわち調整後の膜厚の設定値を選択すればよい。なお、図例では、位相差 $180.0 \pm 6^\circ$ およびハーフトーン反射率 $9.0 \pm 1\%$ 、および位相差 $180.0 \pm 6^\circ$ およびハーフトーン反射率 $5.0 \pm 1\%$ の場合を例示している（図中のシャドウ部参照）。これにより、例えば、Ru層の膜厚13nmおよびTa₂N層の膜厚30nmと設定すれば、位相差 179.4° およびハーフトーン反射率9.5%のハーフトーン型位相シフトが得られるようになる。ここで、反射率は、0.0070で図6で予測されたものと略一致する。図10および図11は、Ru層の膜厚とCr層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した別の例である。これにより、例えば、Ru層の膜厚9nmおよびCr層の膜厚を34nmと設定すれば、位相差 179.2° およびハーフトーン反射率4.1%のハーフトーン型位相シフトマスクが得られるようになる。

【0042】

このようにして第2領域12bの形成膜の複素屈折率および膜厚を設定した後には、その設定に従いつつ反射多層膜基板11上に当該形成膜を成膜することで、ハーフトーン型位相シフトマスクを構成すればよい。なお、形成膜の成膜については、周知技術を用いて行えばよいため、ここではその説明を省略する。

【0043】

つまり、反射多層膜基板11上に形成する第2領域12bを構成する材料群の膜厚および複素屈折率の実部から当該第2領域12bにおける反射多層膜基板11との位相差を求め、また第2領域12bを構成する材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から当該第2領域12bにおける反射率を求め、これらから第1領域

12a (反射多層膜基板 11) と第 2 領域 12b における位相差が 180° 異なり、かつ、第 2 領域 12b の反射率が所望の値である構成、すなわち上述した構成のハーフトーン型位相シフトマスクを得るのである。ただし、位相差と反射率は、どちらを先に求めるようにしても構わない。

【0044】

このような手順で得られるハーフトーン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布について説明する。図 12 は、光学条件が $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ である場合に、マスク上 30nm (ウエハ上座標で表示、4 倍マスクでは 120nm) の開口部を具備するホールパターンにおける光強度分布を示す説明図である。図例では、比較のため、従来のバイナリマスクに対する光強度分布も併せて示している。図例によれば、ハーフトーン型位相シフトマスクを用いた場合には、従来のバイナリマスクに比べてパターンエッジコントラストが向上する効果が得られることが明らかである。

【0045】

なお、ここでは、ハーフトーン型位相シフトマスクとして、図 1 (b) に示した構成の位相シフトマスク 10'、すなわち第 2 領域 12b にのみバッファ膜 13 および吸収膜 14 が形成されたものを例に挙げたが、例えば図 1 (a) に示すようなハーフトーン型位相シフトマスク 10 を構成することも可能である。ただし、その場合であっても、上述したように、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とでは、 180° の位相差が生じるように、それぞれにおける形成膜の膜厚および複素屈折率が設定されているものとする。

【0046】

図 13 は、ハーフトーン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。図例のマスクでは、反射多層膜基板 11 上にて、第 1 領域 12a には Ru 10nm、Si 47nm が順に積層され、第 2 領域 12b には Ru 5nm、Ta N 47nm、Ru 5nm が順に積層されている。第 1 領域 12a の形成膜の構成材料に Si を用いたのは、以下に述べる理由による。Si の複素屈折率は $0.99932-0.00182645i$ であり、その実部は真空中の屈折率である 1 に極めて近く、またその虚部は他材料と比較して小さい。したがって、Si 材料には、その膜内多重干渉効果を利用

することにより、位相差および反射率比を調整する役割を担わせることができるからである。膜内多重干渉効果を利用することによって、第1領域12aと第2領域12bとで180°の位相差が生じ、しかもその上面が完全に平坦なフラット構造のハーフトーン型位相シフトマスクを構成することが可能となる。

【0047】

〔第2の実施の形態〕

次に、位相シフトマスクの製造手順の第2の実施の形態について説明する。第2の実施の形態では、本発明を適用してレベンソン型位相シフトマスクを構成する場合を例に挙げて説明する。図14は、第2の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

【0048】

図14に示すように、レベンソン型位相シフトマスクの製造も、上述した第1の実施の形態におけるハーフトーン型位相シフトマスクの場合（図2参照）と略同様にして行う（S201～S208）。ただし、レベンソン型位相シフトマスクは、第1領域12aと第2領域12bにおける位相が180°異なるだけではなく、第1領域12aと第2領域12bにおける反射率が略等しい点で、ハーフトーン型位相シフトマスクとは異なる。つまり、レベンソン型位相シフトマスクを構成する場合には、①第1領域12aと第2領域12bとで反射率が略等しいこと、②第1領域12aと第2領域12bとの位相差が180°であること、の2条件を満足しなければならない（S208）。

【0049】

これらの条件を満足するか否かの判定は、次のようにして行えばよい。まず、第1領域12aの反射率を R_1 、第2領域12bの反射率を R_2 とした場合に、以下に示す（4）式によって得られる反射率比 P を特定する。

【0050】

【数4】

$$P = (1 - R_1(\lambda) / R_2(\lambda)) \times 100 \quad (\%) \quad \cdots (4)$$

【0051】

そして、特定した反射率比 P に対して、判定基準 1: $|P| \leq 3.0\%$ を適用し、この判定基準 1 に合致していれば、上記①の条件を満足していると判定する。

【0052】

また、上記②の条件については、第 1 の実施の形態で説明した (1) 式によって得られる $\psi(\lambda)$ に対して、判定基準 2: $|\psi(\lambda)| \leq 6^\circ$ を適用する。そして、この判定基準 2 に合致していれば、上記②の条件を満足していると判定する。

【0053】

このようにして得られるレベンソン型位相シフトマスクとしては、図 1 (a) に示した構成のもの、すなわち第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b のいずれにもバッファ膜 13 および吸収膜 14 が形成された構成のものが考えられる。

【0054】

ここで、図 1 (a) に示す構成のレベンソン型位相シフトマスクの製造手順について、具体例を挙げてさらに詳しく説明する。レベンソン型位相シフトマスクを構成する場合にも、第 1 の実施の形態で説明したハーフトーン型位相シフトマスクの場合と同様に、まず、任意の複素屈折率に対する等位相線および等反射率線を求める。図 15 は、等位相線の一具体例を示す説明図である。図例の等位相線は、複素屈折率の虚部 (k) を $0.0100i$ に固定して求めている。

【0055】

ところで、レベンソン型位相シフトマスクでは、第 1 領域 12 a の形成膜と反射多層膜基板 11 との位相差 $\psi_1(\lambda)$ が、以下に示す (5) 式によって特定される。

【0056】

【数 5】

$$\psi_1(\lambda) = \phi_1(\lambda) - \phi_s(\lambda) + (4\pi h_1 \cos \theta) / \lambda \quad \cdots (5)$$

【0057】

また、第 2 領域 12 b の形成膜と反射多層膜基板 11 との位相差 $\psi_2(\lambda)$ が、以下に示す (6) 式によって特定される。

【0058】

【数6】

$$\psi_2(\lambda) = \phi_2(\lambda) - \phi_s(\lambda) + (4\pi h_2 \cos \theta) / \lambda \quad \dots (6)$$

【0059】

したがって、第1領域12aと第2領域12bの位相差 $\psi(\lambda)$ は、以下に示す(7)式によって特定されることになる。

【0060】

【数7】

$$\psi(\lambda) = \psi_1(\lambda) - \psi_2(\lambda) \quad \dots (7)$$

【0061】

この(7)式によって特定される関係は、図15に示したように、等位相線の相対関係で表される。例えば、図中において、複素屈折率の実部が0.94であるような材料で、第1領域12aと第2領域12bの位相差が 180° であるためには、第1領域12aと第2領域12bの段差は56nmであれば良いことがわかる(図中[1]参照)。また、複素屈折率の実部が第1領域12aにおいて0.96、第2領域12bにおいて0.94であるような材料で、第1領域12aと第2領域12bの位相差が 180° であるためには、第1領域12aと第2領域12bの段差は42nmであれば良いことがわかる(図中[2]参照)。一方、反射率を求める場合は、相対値ではなくトータル膜厚に対する絶対値をそのまま用いる。

【0062】

レベンソン型位相シフトマスクを構成する場合にも、このような等位相線(図15参照)および等反射率線(図4参照)を基に、判定基準1および判定基準2を満たすような形成膜の膜厚および複素屈折率を設定すればよい。

【0063】

つまり、反射多層膜基板11上に形成する第1領域12aを構成する材料群の膜厚および複素屈折率の実部から第1領域12aにおける反射多層膜基板との位相差を求め、さらには反射多層膜基板11上に形成する第2領域12bを構成す

る材料群の膜厚および複素屈折率の実部から第2領域12bにおける反射多層膜基板との位相差を求める。また、反射多層膜基板11上に形成する第1領域12aを構成する材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から第1領域12aにおける反射率を求め、さらには反射多層膜基板11上に形成する第2領域12bを構成する材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から第2領域12bにおける反射率を求める。そして、これらの結果から、判定基準1および判定基準2を満たす構成、すなわち第1領域12aと第2領域12bにおける位相差が 180° 異なり、かつ、第1領域12aと第2領域12bの反射率が略等しい構成を、レベンソン型位相シフトマスクとして得るのである。なお、位相差と反射率は、どちらを先に求めるようにしても構わない。

【0064】

ところで、判定基準1および判定基準2を同時に満たすためには、異なった材料を適切に積層して第1領域12aおよび第2領域12bの形成膜を成膜する必要がある。これは、現実存在する材料の複素屈折率の制約から、異なった材料を適切に積層しなければ、判定基準1および判定基準2を同時に満たすレベンソン型位相シフトマスクを現実製造可能な構造として得ることができないからである。

【0065】

このことから、第1領域12aを構成する材料としては、例えばTa₂N₅、RuおよびSiを用いる。また、第2領域12bを構成する材料としては、例えばMoおよびRuを用いる。これらの材料を用いるのは、例えばJpn. J. Appl. Phys. Vol. 40(2001)pp6998-7001の" Approach to patterning of extreme ultraviolet lithography masks" で開示されているように、各材料のエッチング選択比を次に述べるように組み合わせにおいて非常に大きく取ることが公知だからである。すなわち、Si下地に対するRu層のエッチングをCl₂+O₂ガスによるドライエッチングで行う場合、Si下地はRuエッチングに対しエッチングストップとして作用する。Ru下地に対するTa₂N₅層のエッチングをAr+Cl₂ガスによるドライエッチングで行う場合、Ru下地はTa₂N₅層エッチングに対しエッチングストップとして作用する。また、Ru下地に対するMo層のエッチングおよびSi層のエ

チングも $\text{Ar}+\text{Cl}_2$ ガスによるドライエッチングで行い選択比を大きく取る。なぜならば、 Ru の塩化物 RuCl_3 は比較的安定な物質であり 600°C 以上で分解する。一方、 Si の塩化物 SiCl_4 の沸点は 57.6°C 、 Mo の塩化物 MoCl_5 の沸点は 268°C 、 Ta の塩化物 TaCl_5 の沸点は 242°C であり、 Ru の塩化物に対して真空中でエッチング反応ガスとして除去され易いためである。

【0066】

図16は、レベンソン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造1」という）は、図15の等位相線および図4の等反射率線を基に設定された、判定基準1および判定基準2を満たす構成である。第1領域12aでは、反射多層膜基板11上に Ru 2nm、 Ta N 7nm、 Ru 4nmの順に積層されて形成膜を構成している。第1領域12aのトータル膜厚は11nm、合成複素屈折率の実部は0.9165であり、虚部は0.02507iである。また、第2領域12bでは、 Ru 4nm、 Mo 49nm、 Ru 2nmの順に積層されて形成膜を構成している。第2領域12bのトータル膜厚は55nm、合成複素屈折率の実部は0.9174であり、虚部は0.00764iである。なお、第1領域12aと第2領域12bとの境界部分には、膜厚120nmの Ta N吸収層が40nm幅で形成されている。

【0067】

このような構造1において、図15の等位相線から第1領域12aと第2領域12bの段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は43nmであり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めても43nmである。また、図4の等透過率線によれば、第1領域12aの反射率は0.39であり、第2領域12bの反射率は0.38であることがわかる。そして、構造1について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第2領域12bの Mo 膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば図17に示す結果が得られる。図例の結果から、図16に示した構造1は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。

【0068】

また、構造1において、反射率は、第1領域12aに対して0.388であり、第2領域12bに対して0.387であり、これらの間の反射率比は0.258%となる。ま

た、第1領域12aと第2領域12bの位相差は、TE (transverse electric) 波に対して 178.8° 、TM (transverse magnetic) 波に対して 178.7° となる。

【0069】

このような構造1のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造1の4倍マスク上に膜厚120nmのTaN吸収層を40nm幅（ウエハ上単位では10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図18に示すような結果となる。

【0070】

また、第1領域12aと第2領域12bの位相差が 180° であることは、40nm幅のTaN吸収層による320nmピッチ（ウエハ上単位では10nm幅で80nmピッチ）のパターンを用いて、以下に示す(8)式の位相差を求めることで確認できる。なお、(8)式では、ウエハ上における座標を用いている。x軸の単位はnmである。

【0071】

【数8】

$$\varphi = I(x+80) - I(x) \quad (0 \leq x \leq 80) \quad \dots (8)$$

【0072】

この(8)式をTE_y波、TM_x波およびTM_z波に対してマスク直上において求めた結果を図19に示す。図例によれば、TE_y波およびTM_x波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は0.45%程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0073】

これらのことから、構造1のレベンソン型位相シフトマスクは、判定基準1および判定基準2を同時に満たしており、第1領域12aと第2領域12bとで反射率が略等しく、その位相差が 180° であると言える。

【0074】

次いで、このように複素屈折率および膜厚が設定された第1領域12aの形成膜および第2領域12bの形成膜を、反射多層膜基板11上に成膜する場合の手順について簡単に説明する。図20～23は、構造1の成膜手順の一例を示す説明図である。構造1による形成膜を成膜する場合には、図20に示すように、先ず、反射多層膜基板11上にRu層をスパッタ法により成膜する（工程1）。Ru層は、通常、バイナリマスクでバッファ層として用いられる材料であるので、その通常の場合と同じ製造装置を用いることができる。そして、Ru層上に、TaN層をスパッタ法により成膜する（工程2）。TaN層は、バイナリマスクで吸収層として用いられる材料であるので、その通常の場合と同じ製造装置を用いることができる。

【0075】

その後は、TaN層上にレジストを塗布し（工程3）、描画およびレジスト現像工程を経て、第2領域12bの部分のレジストを除去する（工程4）。レジスト除去後は、第2領域12bの部分のTaN層をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングによって除去する（工程5）。このTaN層の下のRu層はエッチングストップ層として機能することになる。そして、レジストを剥離し（工程6）、再びRu層をスパッタ成膜した後に（工程7）、今度はMo層をスパッタ成膜する（工程8）。Mo層は、反射多層膜基板11の構成材料であるので、多層膜用製造装置を用いることができる。

【0076】

Mo層を成膜すると、続いて、図21に示すように、レジストを塗布した後に（工程9）、描画およびレジスト現像工程を経て、第1領域12aの部分のレジストを除去する（工程10）。そして、第1領域12aの部分のMo層をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングにより除去する（工程11）。このMo層の下のRu層はエッチングストップ層として機能することになる。その後は、レジストを剥離し（工程12）、再びRu層をスパッタ成膜する（工程13）。

【0077】

Ru層を成膜した後は、次いで、図22に示すように、TaN吸収層をスパッタ成膜し（工程14）、さらにレジストを塗布する（工程15）。そして、描画

およびレジスト現像工程を経て、吸収層として残す部分以外のレジストを除去する（工程 16）。

【0078】

その後、図 23 に示すように、TaN 吸収層を Ar+Cl₂ ガスによるドライエッチングにより除去する（工程 17）。この TaN 吸収層の下層の Ru 層はエッチングストップ層として機能することになる。そして、レジストを剥離すれば（工程 18）、Ru 層をエッチングストップ層として有効に用いつつ、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクを構成することができる。

【0079】

図 24 は、レベンソン型位相シフトマスクの他の構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 2」という）も、上述した構造 1 と同様に、図 15 の等位相線および図 4 の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成である。第 1 領域 12a では、反射多層膜基板 11 上に Ru 3nm、TaN 5nm、Ru 7nm の順に積層されて形成膜を構成している。第 1 領域 12a のトータル膜厚は 15nm、合成複素屈折率の実部は 0.9054 であり、虚部は 0.02217i である。また、第 2 領域 12b では、Ru 3nm、Mo 49nm、Ru 4nm の順に積層されて形成膜を構成している。第 2 領域 12b のトータル膜厚は 56nm、合成複素屈折率の実部は 0.9169 であり、虚部は 0.00782i である。

【0080】

このような構造 2 において、図 15 の等位相線から第 1 領域 12a と第 2 領域 12b の段差を求めると、90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は 44nm であり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めても 44nm である。また、図 4 の等透過率線によれば、第 1 領域 12a の反射率は 0.38 であり、第 2 領域 12b の反射率は 0.36 であることがわかる。そして、構造 2 について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第 2 領域 12b の Mo 膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば図 25 に示す結果が得られる。図例の結果から、図 24 に示した構造 2 は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。

【0081】

また、構造 2 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.399 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.396 であり、これらの間の反射率比は 0.710% となる。したがって、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、TE 波に対して 178.2° 、TM 波に対して 178.3° となる。

【0082】

このような構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 2 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図 2 6 に示すような結果となる。

【0083】

また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の TaN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を TE_y 波、TM_x 波および TM_z 波に対してマスク直上において求めた結果を図 2 7 に示す。図例によれば、TE_y 波および TM_x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0084】

このように複素屈折率および膜厚が設定された構造 2 の成膜手順については、上述した構造 1 の場合と略同様である。構造 1 の場合とは、工程 5 と工程 6 との間に、第 2 領域 1 2 b の部分の Ru 層を Cl₂+O₂ ガスによるドライエッチングにより除去する工程が追加される点で異なる。

【0085】

図 2 8 は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 3」という）も、上述した構造 1 および構造 2 と同様に、図 1 3 の等位相線および図 4 の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成である。第 1 領域 1 2 a では、反射多層膜基板 1 1 上に Ru 5nm、TaN 20nm、Si 8nm、Ru 5nm の順に積層され

て形成膜を構成している。また、第2領域12bでは、Ru 5nm、Si 8nm、Ru 43.5nmの順に積層されて形成膜を構成している。

【0086】

この構造3では、構造1または構造2の場合とは異なり、第1領域12aおよび第2領域12bの形成膜の構成材料にSiを用いている。ここで、Siの複素屈折率は、 $0.99932-0.00182645i$ であり、複素屈折率の実部は真空中の屈折率である1に極めて近く、また複素屈折率の虚部は他材料と比較して小さい。そのため、Si材料は、膜内多重干渉効果の利用により、位相差および反射率比を調整する役割を担うことになる。

【0087】

したがって、図15の等位相線および図4の等反射率線から判定基準1および判定基準2を満たす構成を得る場合には、Si層を考慮せずに、位相差を重点的に合わせ込む条件を抽出し、その後にSi層の膜内多重干渉により反射率を合わせ込むとともに、位相差を 180° 近くに調整する手順を採る、といったことが可能となる。すなわち、判定基準1および判定基準2を満たす構成は、第1領域12aに対しては反射多層膜基板11上にRu 5nm、Ta N20nm、Ru 5nmの順に積層したものと考え、第2領域12bに対してはRu 5nm、Ru 43.5nmの順に積層したものと考える。この場合の第1領域12aのトータル膜厚は30nm、合成複素屈折率の実部は0.9234であり、虚部は $0.02687i$ である。第2領域12bのトータル膜厚は48.5nm、合成複素屈折率の実部は0.8875であり、虚部は $0.01747i$ である。

【0088】

このような構造3において、図15の等位相線から第1領域12aと第2領域12bの段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は22nmであり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めると16nmである。また、図4の等透過率線によれば、第1領域12aの反射率は0.14であり、第2領域12bの反射率は0.18であることがわかる。そして、構造3について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第2領域12bのMo膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば図29に示す結果が得られる。図例の結果から、図28に示し

た構造 3 は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。この構造 3 では、第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b の形成膜の構成材料に Si を用いており、その Si 層による膜内多重干渉を効果的に利用していることから、位相差と反射率比が基準値を満たすことになる条件を実現することができるのである。

【0089】

また、構造 3 において、反射率は、第 1 領域 12 a に対して 0.195 であり、第 2 領域 12 b に対して 0.200 であり、これらの間の反射率比は 2.41% となる。したがって、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差は、TE 波に対して 185.3° 、TM 波に対して 185.1° となる。

【0090】

このような構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 3 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TAN 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図 30 に示すような結果となる。

【0091】

また、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の TAN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を TE_y 波、TM_x 波および TM_z 波に対してマスク直上において求めた結果を図 31 に示す。図例によれば、TE_y 波および TM_x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0092】

このように複素屈折率および膜厚が設定された構造 3 の成膜手順についても、上述した構造 2 の場合と略同様である。構造 2 の場合とは、工程 8 にて、Mo 層に代わって Si 層および Ru 層をスパッタ成膜する点で異なる。

【0093】

ところで、構造 1～3 では、いずれも、第 1 領域 1 2 a の形成膜と第 2 領域 1 2 b の形成膜とに膜厚差があり、それぞれの間に段差が生じている。このような構成であっても、上述したように位相シフトの効果を得ることが可能である。ただし、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との境界部分に TaN 吸収層を形成することを考慮すると、その加工の容易さの点で、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との間に段差がなく、平坦に形成されているほうが望ましい。そこで、以下に、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とが平坦である構成の具体例について説明する。

【0094】

図 3 2 は、レベenson 型位相シフトマスクの平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 4」という）は、図 1 5 の等位相線および図 4 の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成である。第 1 領域 1 2 a では、反射多層膜基板 1 1 上に Ru 3nm、TaN 7nm、Ru 6nm、Si 37nm、Ru 5nm の順に積層されて形成膜を構成している。また、第 2 領域 1 2 b では、Ru 3nm、Mo 47nm、Ru 8nm の順に積層されて形成膜を構成している。

【0095】

この構造 4 において、第 1 領域 1 2 a の形成膜の構成材料に Si を用いているのは、構造 3 の場合と同様に、膜内多重干渉効果の利用により位相差および反射率比を調整する役割を担わせるためである。したがって、図 1 5 の等位相線および図 4 の等反射率線から判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成を得る場合には、Si 層を考慮せずに、位相差を重点的に合わせ込む条件を抽出し、その後に Si 層の膜内多重干渉により反射率を合わせ込むとともに、位相差を 180° 近くに調整する手順を採る、といったことが可能となる。すなわち、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成は、第 1 領域 1 2 a に対しては反射多層膜基板 1 1 上に Ru 3nm、TaN 7nm、Ru 6nm、Ru 5nm の順に積層したものと考え、第 2 領域 1 2 b に対しては Ru 3nm、Mo 47nm、Ru 8nm の順に積層したもの考える。この場合の第 1 領域 1 2 a のトータル膜厚は 21nm、合成複素屈折率の実部は 0.9054 であり、虚部は 0.03631i である。第 2 領域 1 2 b のトータル膜厚は 58nm、

合成複素屈折率の実部は0.9147であり、虚部は0.000904iである。

【0096】

このような構造4において、図15の等位相線から第1領域12aと第2領域12bの段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は40nmであり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めると43nmである。また、図4の等透過率線によれば、第1領域12aの反射率は0.15であり、第2領域12bの反射率は0.30であることがわかる。

【0097】

このように、構造4では、Si層を考慮しないと、構造1および構造2に類似しているものの、第1領域12aと第2領域12bとで反射率が一致しない。これを解消するために、構造4では、Si層を挿入し、膜内多重干渉を効果的に利用することで、第1領域12aと第2領域12bにおける反射率を一致させているのである。

【0098】

そのために、構造4においては、第1領域12aのTa₂N₅層の膜厚、第2領域12bのMo層の膜厚、および第1領域12aのSi層の膜厚を適宜変化させ、判定基準1および判定基準2を満たす構成を求める。図33は、Ta₂N₅層の膜厚およびSi層の膜厚を一定としMo層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、図32に示した構造4は、第1領域12aと第2領域12bの膜厚差が0nmとなる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造4では、第1領域12aの形成膜の構成材料にSiを用いており、そのSi層による膜内多重干渉を効果的に利用していることから、位相差と反射率比が基準値を満たし、かつ、第1領域12aと第2領域12bとが平坦になる構成を実現することができるのである。

【0099】

また、構造4において、反射率は、第1領域12aに対して0.285であり、第2領域12bに対して0.287であり、これらの間の反射率比は0.65%となる。したがって、第1領域12aと第2領域12bの位相差は、TE波に対して 180.8° 、TM波に対して 180.5° となる。

【0100】

このような構造4のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造4の4倍マスク上に膜厚120nmのTa₂N₅吸収層を40nm幅（ウエハ上単位では10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、NA=0.25、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図34に示すような結果となる。

【0101】

また、第1領域12aと第2領域12bの位相差が 180° であることは、40nm幅のTa₂N₅吸収層による320nmピッチ（ウエハ上単位では10nm幅で80nmピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式をTE_y波、TM_x波およびTM_z波に対してマスク直上において求めた結果を図35に示す。図例によれば、TE_y波およびTM_x波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は0.45%程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0102】

このように複素屈折率および膜厚が設定された構造4の成膜手順については、上述した構造1の場合（図20～23参照）に加えて、構造2の場合と同様に工程5と工程6との間にて第2領域12bの部分のRu層をCl₂+O₂ガスによるドライエッチングにより除去する工程を行うとともに、に工程13と工程14との間にて図36、37に示すような工程を行えばよい。

【0103】

すなわち、図36に示すように、工程13にてRu層を成膜した後は、次いで、Si層をスパッタ成膜し（工程13-1）、さらにレジストを塗布する（工程13-2）。そして、描画およびレジスト現像工程を経て、第2領域12bの部分のレジストを除去する（工程13-3）。

【0104】

その後、図37に示すように、第2領域12bの部分のSi膜をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングにより除去する（工程13-4）。このSi層の下のRu層はエッチングストッパ層として機能することになる。そして、レジストを剥離

して（工程 13-5）、Ru 層をスパッタ成膜した後は（工程 13-6）、Ta N 吸収層をスパッタ成膜し（工程 14）、それ以降、構造 1 の場合と同様の処理を行う。このような成膜手順によって、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクを構成することができる。

【0105】

以上のように、構造 4 については、第 1 領域 12a の Ta N 層の膜厚、第 2 領域 12b の Mo 層の膜厚、および第 1 領域 12a の Si 層の膜厚を適宜変化させ、判定基準 1 および判定基準 2 を満たし、かつ、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とが平坦である構成を特定している。ただし、このような構成は、以下に述べるような構成においても得ることができる。

【0106】

図 38 は、レベンソン型位相シフトマスクの他の平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 5」という）も、Ta N 層の膜厚および Si 層の膜厚を一定にして Mo 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図 39 は、Ta N 層の膜厚および Si 層の膜厚を一定とし Mo 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、構造 5 についても、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b の膜厚差が 0nm となる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造 5 において、反射率は、第 1 領域 12a に対して 0.288 であり、第 2 領域 12b に対して 0.287 であり、これらの間の反射率比は 0.36% である。また、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b の位相差は、TE 波に対して 181.4° 、TM 波に対して 181.1° である。

【0107】

このような構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 5 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の Ta N 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図 40 に示すような結果となる。

【0108】

また、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b の位相差が 180° であることは、40nm

幅の TaN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を TE_y 波、TM_x 波および TM_z 波に対してマスク直上において求めた結果を図 4 1 に示す。図例によれば、TE_y 波および TM_x 波ともに、180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z 波は、180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0109】

このような構造 5 の成膜手順については、上述した構造 4 の場合と同様である。

【0110】

図 4 2 は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 6」という）も、TaN 層の膜厚および Si 層の膜厚を一定にして Mo 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図 4 3 は、TaN 層の膜厚および Si 層の膜厚を一定とし Mo 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、構造 6 についても、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の膜厚差が 0 nm となる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造 6 において、反射率は、第 1 領域 12 a に対して 0.300 であり、第 2 領域 12 b に対して 0.287 であり、これらの間の反射率比は 0.90% である。また、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差は、TE 波に対して 180.6°、TM 波に対して 180.3° である。

【0111】

このような構造 6 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 6 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、NA=0.25、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば図 4 4 に示すような結果となる。

【0112】

また、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差が 180° であることは、40nm

幅の T a N 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を T E_y 波、T M_x 波および T M_z 波に対してマスク直上において求めた結果を図 4 5 に示す。図例によれば、T E_y 波および T M_x 波ともに、180° の位相差を良好に保持している。一方、T M_z 波は、180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

【0113】

このような構造 6 の成膜手順についても、上述した構造 4 または構造 5 の場合と同様である。

【0114】

次に、以上のようなレベンソン型位相シフトマスクにおける効果を、従来の位相シフト効果を用いないバイナリマスクとの比較において説明する。図 4 6 は、上述した構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクについて、構造 5 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の T a N 吸収層を 40nm 幅、30nm 幅、20nm 幅、10nm 幅、0nm 幅（ウエハ上単位では 10nm、7.5nm、5nm、2.5nm、0nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、N A = 0.25、 σ = 0.70 という光学条件で得られた光強度分布を示す説明図である。図例によれば、いずれの T a N 吸収層幅においても、良好なパターンコントラストが得られることがわかる。

【0115】

これに対して、図 4 7 は、従来のバイナリマスクについて、そのマスク上に膜厚 120nm の T a N 吸収層を 40nm 幅、30nm 幅、20nm 幅、10nm 幅（ウエハ上単位では 10nm、7.5nm、5nm、2.5nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、N A = 0.25、 σ = 0.70 という光学条件で得られた光強度分布を示す説明図である。図例によれば、T a N 吸収層幅が小さくなるに伴って、パターンコントラストが著しく低下することがわかる。

【0116】

これらのことから、上述した構造のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合には、T a N 吸収層 10nm 幅（ウエハ上単位では 2.5nm）においてウエハ上で 15n

mまたはこれ以下のサイズの線幅の転写を行うことが可能となる、といった顕著な効果が得られると言える。さらには、例えば図48に示すように、 $NA=0.30$ の光学条件で露光すれば、 TaN 吸収層10nm幅（ウエハ上単位では2.5nm）においてウエハ上で10nmまたはこれ以下のサイズの線幅の転写を行うことが可能になる、といった顕著な効果も得られるようになる。

【0117】

以上のように、本実施形態（第1および第2の実施の形態）にて説明した位相シフトマスクでは、第1領域12aおよび第2領域12bの形成膜の膜厚および複素屈折率が、それぞれでの極短紫外光の反射光に所定の位相差が生じるように設定されている。さらに詳しくは、位相シフトマスクを構成するのにあたり、先ず、反射多層膜基板11上の形成膜（特に、その構成材料における複素屈折率）に依存することなく、任意の複素屈折率および膜厚について当該複素屈折率および当該膜厚から得られる反射光の位相および反射率を特定し、その特定した位相および反射率に基づいて、第1領域12aと第2領域12bで 180° の位相差が生じるように、それぞれにおける形成膜の膜厚および複素屈折率が選定されている。

【0118】

したがって、本実施形態で説明した位相シフトマスクによれば、極短紫外光に対応する反射型マスクの場合であっても、超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。すなわち、本実施形態で説明した位相シフトマスクの製造方法を用いれば、極短紫外光の位相シフトマスクを構成することができる。

【0119】

しかも、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、単に極短紫外光を用いるだけではなく、超解像技術をも利用することで、ウエハ上のパターンコントラストを著しく増大させ、従来のバイナリマスクでは得られなかった解像性を得ることができる。つまり、本実施形態の位相シフトマスクを用いて半導体装置を製造すれば、従来のバイナリマスクを用いた場合よりもより微細なホールパターン、スペースパターンおよびラインパターンを得ることができ、パターンの極小化

への対応に非常に好適となる。

【0120】

また、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、膜内多重干渉を効果的に利用することで、第1領域12aと第2領域12bとで形成膜の膜厚を略等しくして、これら第1領域12aと第2領域12bとが平坦になる構成を実現している。したがって、例えばレベンソン型位相シフトマスクにおいて第1領域12aと第2領域12bとの境界部分にTaN吸収層を形成する場合であっても、平坦部分にその形成を行えばよいため、加工が非常に容易なものとなり、またその形成精度の確保も容易となる。

【0121】

また、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、第1領域12aの形成膜および第2領域12bの形成膜の両方またはいずれか一方が、複数の材料からなる積層構造を有している。したがって、任意の複素屈折率および膜厚について当該複素屈折率および当該膜厚から得られる反射光の位相および反射率を特定しても、その任意の複素屈折率および膜厚に対応する形成膜を得ることが可能となる。つまり、複数の材料からなる積層構造を用いることによって、所望する位相シフトマスクを構成することが可能となるのである。

【0122】

【発明の効果】

以上に説明したように、本発明に係る極短紫外光の位相シフトマスクおよびその製造方法によれば、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、極短紫外光に対応する反射型マスクの場合であっても、超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。また、本発明に係る半導体装置の製造方法によれば、パターンの極小化への対応に非常に好適となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明に係る位相シフトマスクの概略構成の一例を示す模式図である。

【図2】

本発明の第1実施形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャ

ートである。

【図 3】

等位相線の一具体例を示す説明図である。

【図 4】

等反射率線の一具体例を示す説明図である。

【図 5】

ハーフトーン型位相シフトマスクを得るための R_u 膜厚および $T_a N$ 膜厚に対する合成複素屈折率の実部の分布を示す説明図である。

【図 6】

ハーフトーン型位相シフトマスクにおけるトータル膜厚と合成複素屈折率の実部 (n) および反射率 (k) の関係を示す説明図である。

【図 7】

ハーフトーン型位相シフトマスクにおけるトータル膜厚と R_u 膜厚および $T_a N$ 膜厚との関係を示す説明図である。

【図 8】

ハーフトーン型位相シフトマスクを得るための R_u 膜厚および $T_a N$ 膜厚に対する合成複素屈折率の虚部の分布を示す説明図である。

【図 9】

R_u 層の膜厚と $T_a N$ 層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

【図 10】

R_u 層の膜厚と C_r 層の膜厚に対する位相差をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

【図 11】

R_u 層の膜厚と C_r 層の膜厚に対するハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

【図 12】

ハーフトーン型位相シフトマスクの $NA=0.25$ の場合におけるマスク上 $30nm$ (ウエハ上座標で表示) の開口部を具備するホールパターンの光強度分布を示す説

明図である。

【図 13】

ハーフトーン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。

【図 14】

本発明の第2の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

【図 15】

等位相線の一具体例を示す説明図である。

【図 16】

レベンソン型位相シフトマスクの構成例（構造1）の断面構造を示す模式図である。

【図 17】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（M₀膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

【図 18】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

【図 19】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウエハ上で表示）を示す説明図である。

【図 20】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その1）である。

【図 21】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その2）である。

【図 22】

構造1のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その

3) である。

【図 2 3】

構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図 (その 4) である。

【図 2 4】

レベンソン型位相シフトマスクの他の構成例 (構造 2) の断面構造を示す模式図である。

【図 2 5】

構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化 (M o 膜厚をパラメータとしている) の例を示す説明図である。

【図 2 6】

構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

【図 2 7】

構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差 (ウエハ上で表示) を示す説明図である。

【図 2 8】

レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の構成例 (構造 3) の断面構造を示す模式図である。

【図 2 9】

構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化 (M o 膜厚をパラメータとしている) の例を示す説明図である。

【図 3 0】

構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

【図 3 1】

構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差 (ウエハ上で表示) を示す説

明図である。

【図 3 2】

レベンソン型位相シフトマスクの第 1 領域と第 2 領域とが平坦な構成例（構造 4）の断面構造を示す模式図である。

【図 3 3】

構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M_0 膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

【図 3 4】

構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

【図 3 5】

構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウェハ上で表示）を示す説明図である。

【図 3 6】

構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 3）である。

【図 3 7】

構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 4）である。

【図 3 8】

レベンソン型位相シフトマスクの他の平坦な構成例（構造 5）の断面構造を示す模式図である。

【図 3 9】

構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M_0 膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

【図 4 0】

構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図であ

る。

【図 4 1】

構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウエハ上で表示）を示す説明図である。

【図 4 2】

レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の平坦な構成例（構造 6）の断面構造を示す模式図である。

【図 4 3】

構造 6 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M_0 膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

【図 4 4】

構造 6 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

【図 4 5】

構造 6 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウエハ上で表示）を示す説明図である。

【図 4 6】

構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクにおけるマスク上 Ta N 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.25$ ）を示す説明図である。

【図 4 7】

従来のバイナリマスクにおけるマスク上 Ta N 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.25$ ）を示す説明図である。

【図 4 8】

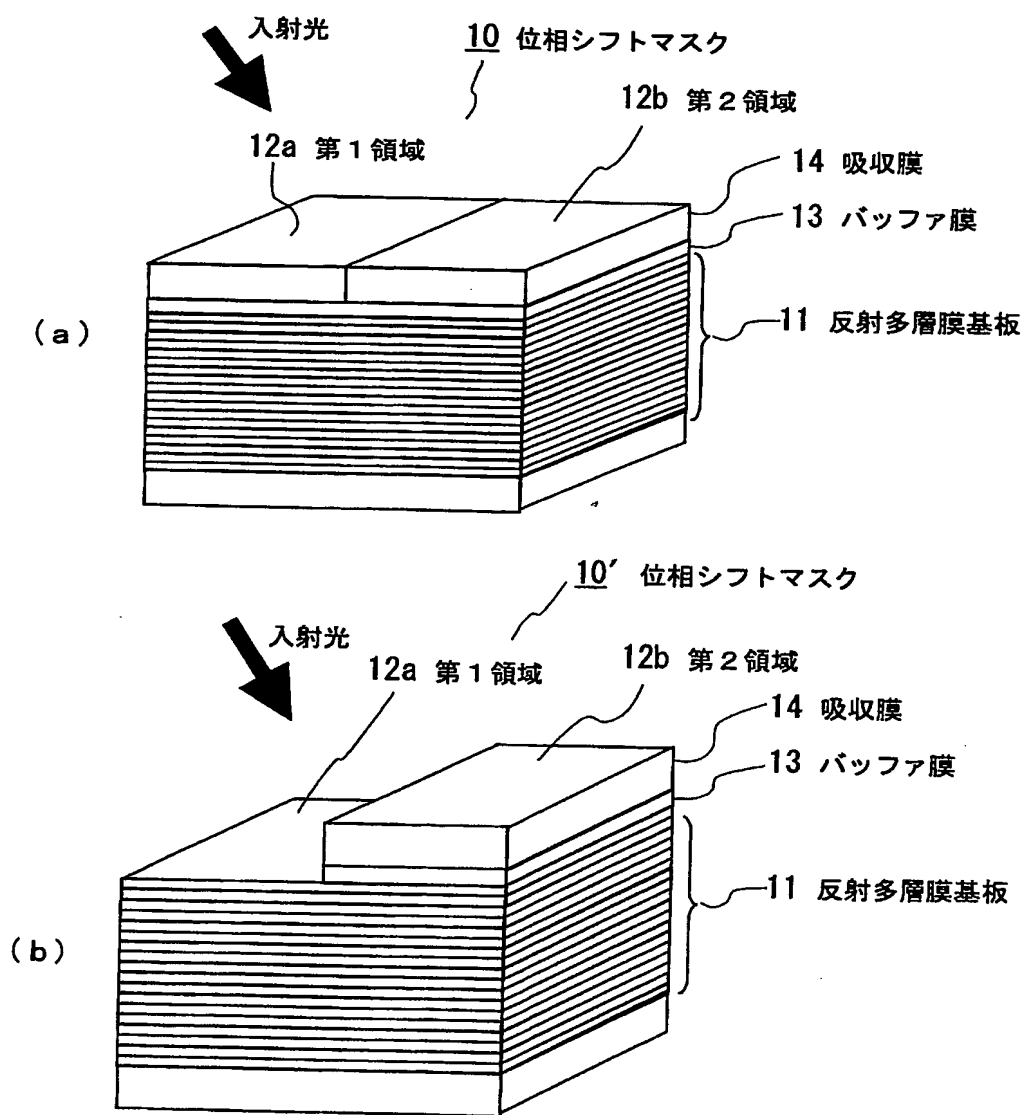
構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクにおけるマスク上 Ta N 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.30$ ）を示す説明図である。

【符号の説明】

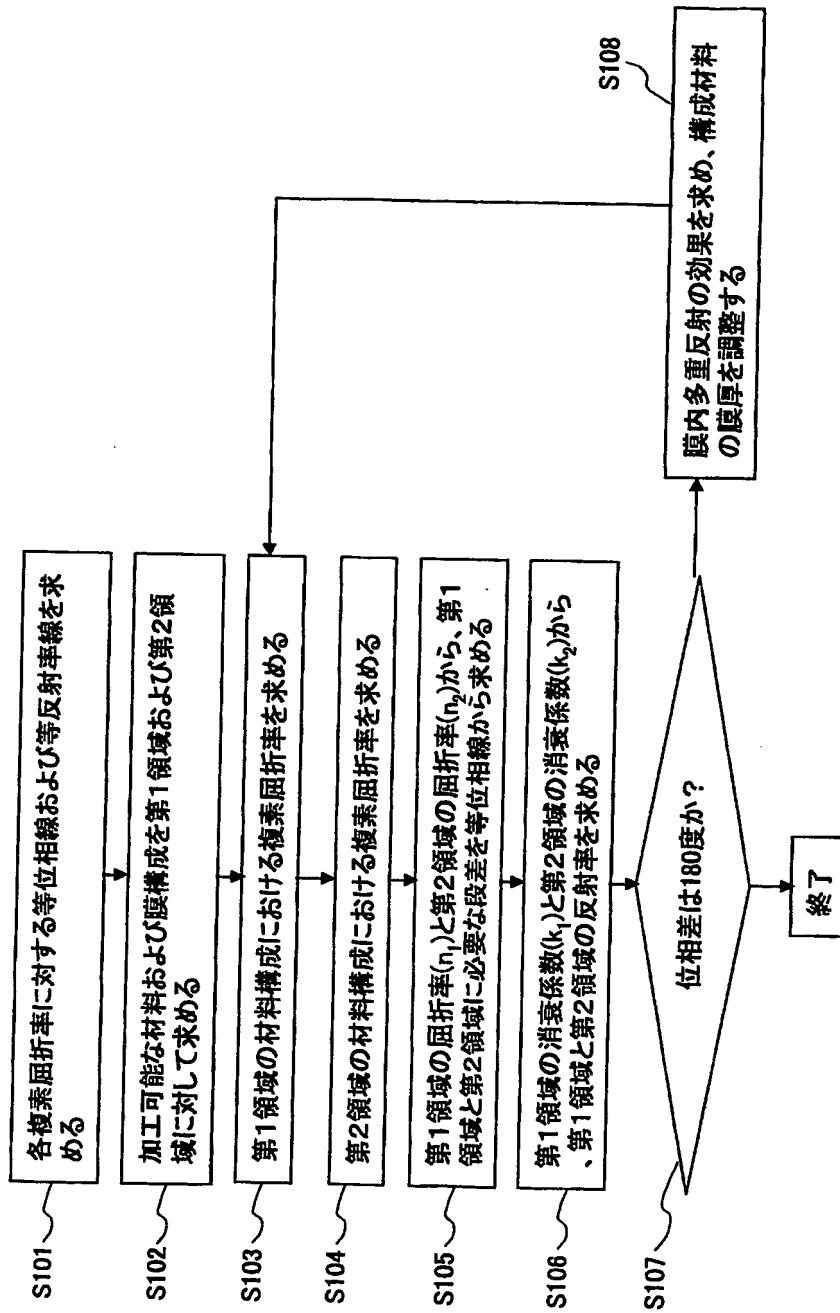
10, 10' …位相シフトマスク、11…反射多層膜基板、12a…第1領域、12b…第2領域、13…バッファ膜、14…吸収膜

【書類名】 図面

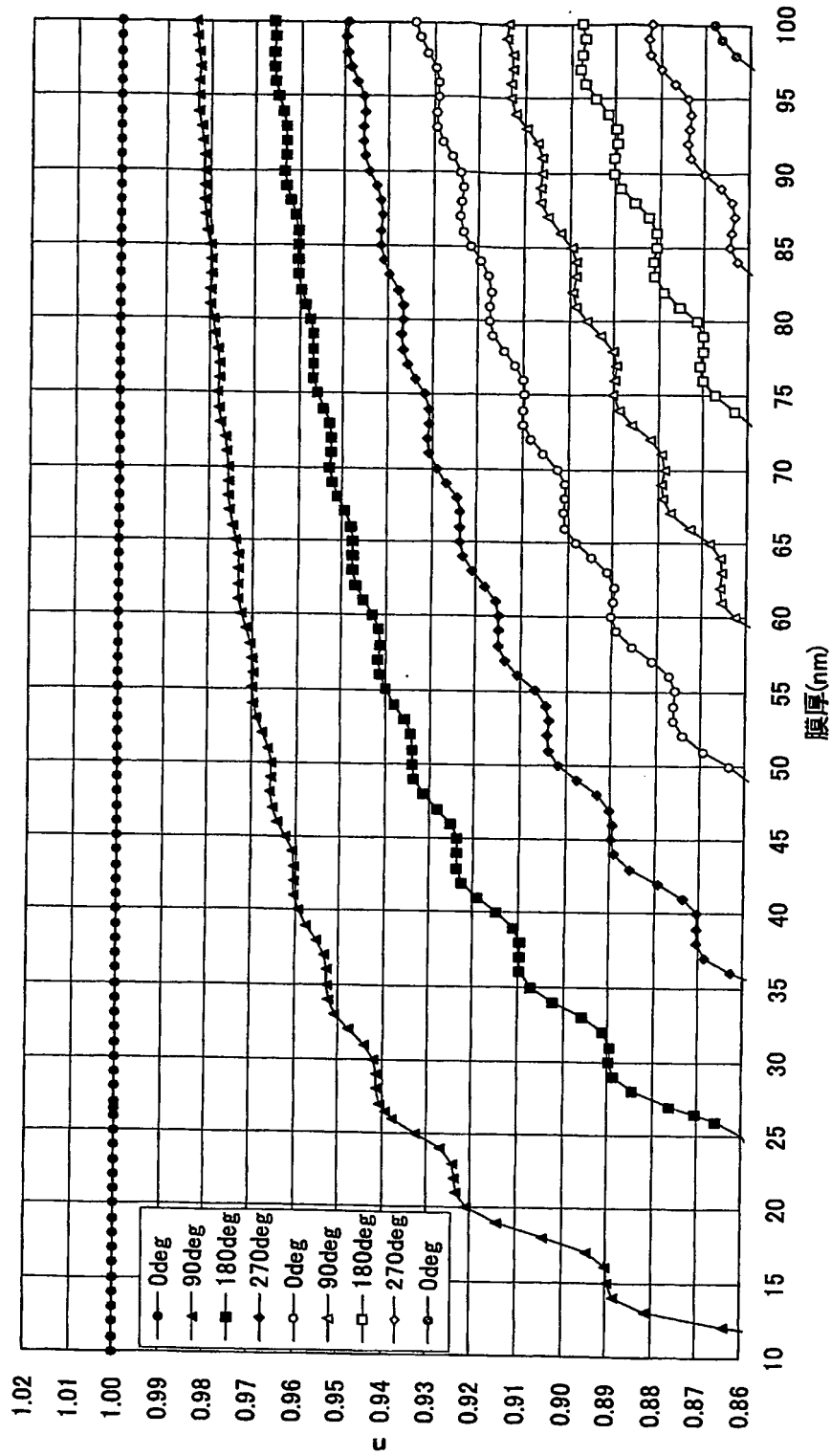
【図 1】



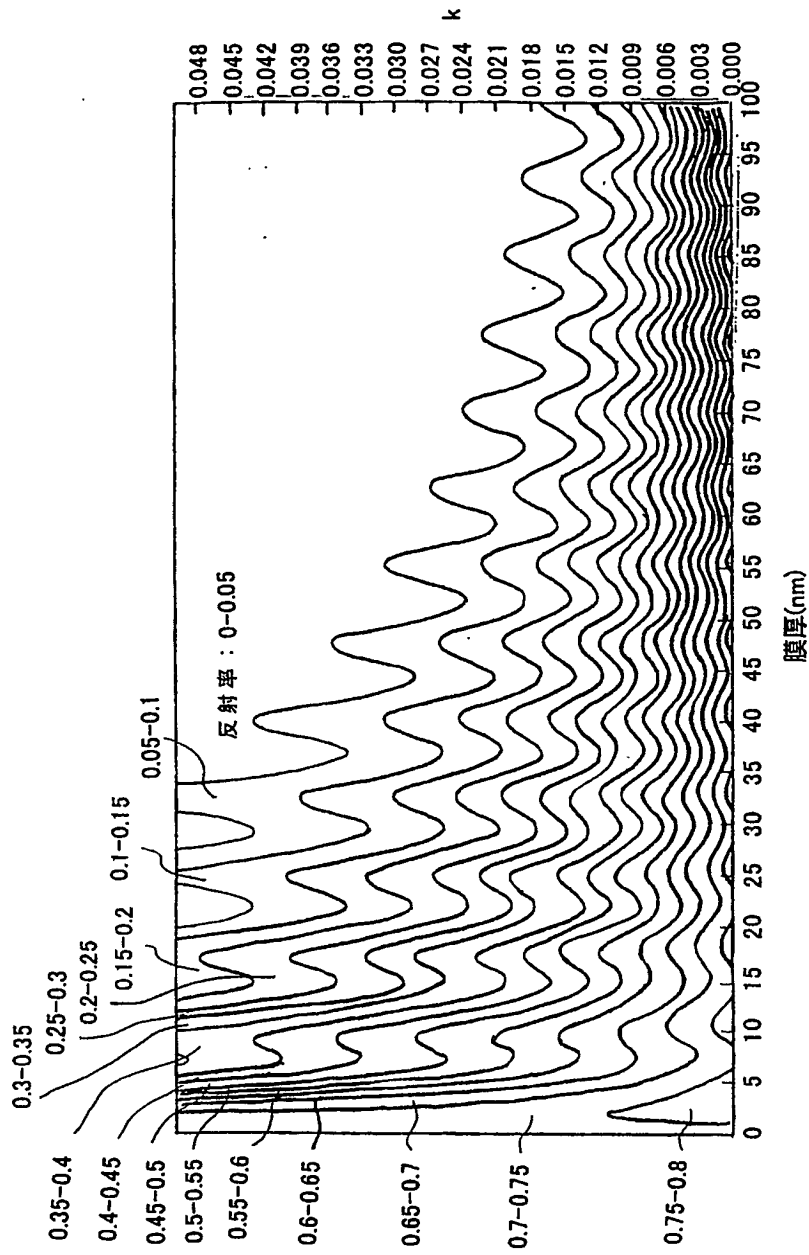
【図2】



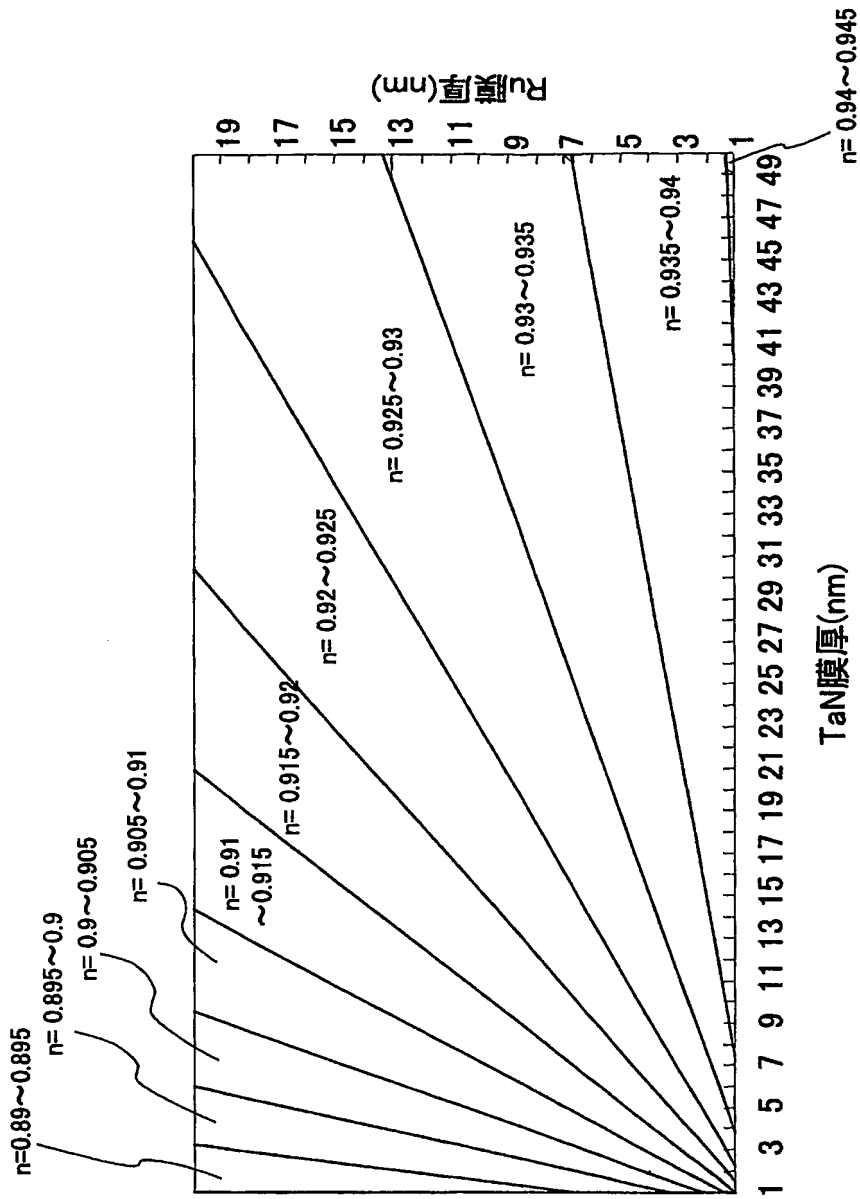
【図3】



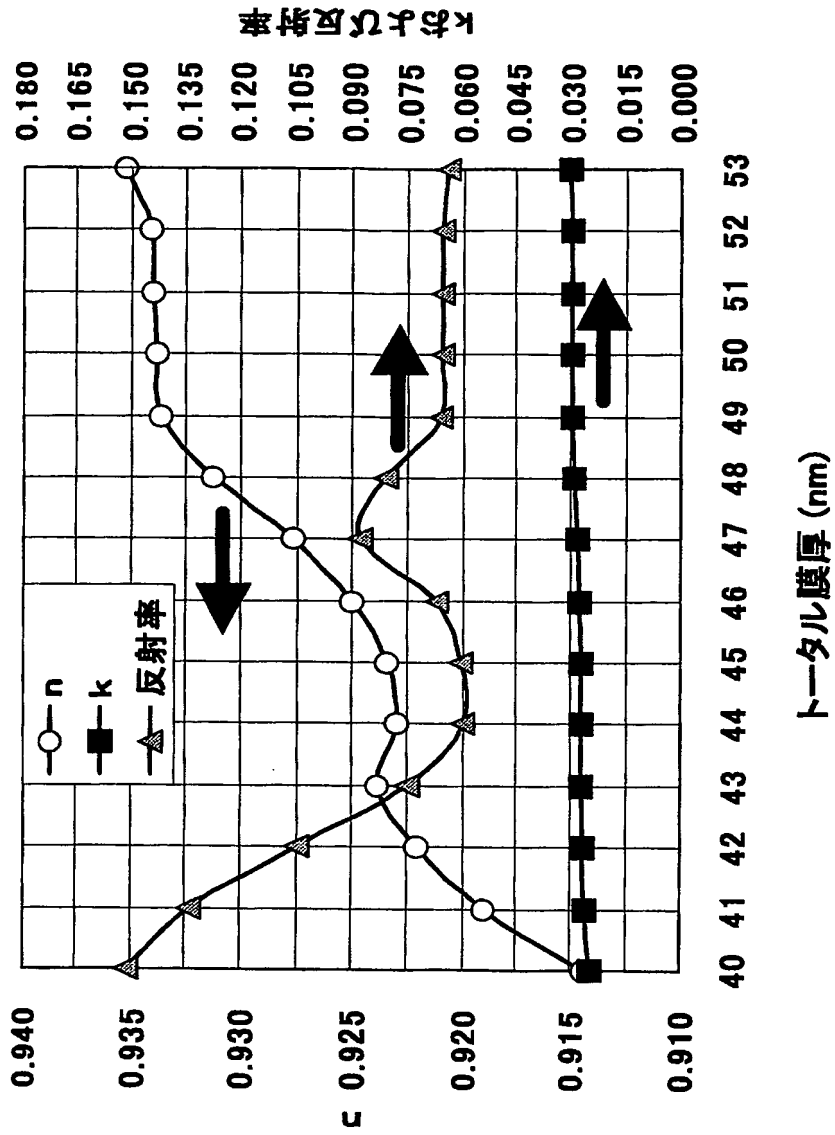
【図 4】



【図 5】



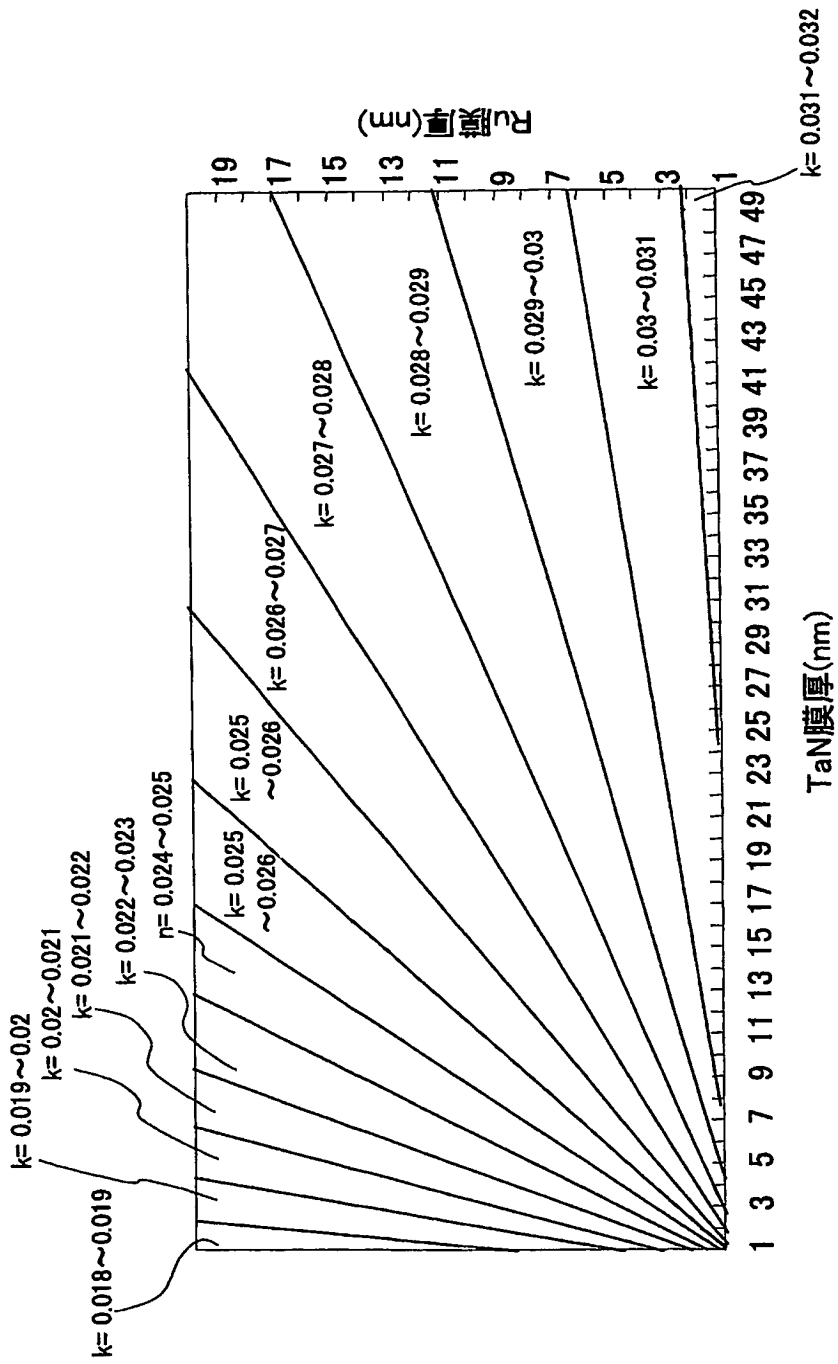
【図 6】



【図 7】

トータル膜厚と Ru 厚および TaN 厚		
トータル厚(nm)	Ru 厚(nm)	TaN 厚(nm)
40	20	20
41	17	24
42	15	27
43	14	29
44	15	29
45	15	30
46	14	32
47	12	35
48	9	39
49	7	42
50	7	43
51	7	44
52	7	45
53	6	47

【図 8】



【図9】

位相	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Ru/Tm																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						

ハートン	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Ru/Tm																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						

【図 10】

位相差

Ru/Cr	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
0						106.3	159.4	168.7	178.9	186.2	186.8	180.9	177.5
1										133.953	128.115	124.898	129.087
2											126.647	130.742	140.4
3											134.212	143.416	154.824
4											138.817	147.444	158.579
5									158.6	151.3	162.2	172.4	177.5
6								146.2	154.0	164.7	175.0	180.8	177.2
7							147.361	155.0	165.7	176.0	181.7	178.6	170.8
8						147.4	155.0	165.8	176.1	181.7	178.7	170.9	169.9
9			286.0	146.5	148.0	155.5	166.1	176.4	182.1	179.2	171.6	170.5	177.8
10		153.3	149.2	150.3	157.5	167.9	178.1	184.3	181.7	174.4	173.034	179.82	191.385
11	157.9	153.9	154.6	161.2	171.2	181.35	187.667	186.276	179.45	173.51	183.88	194.657	206.692
12	159.5	159.6	165.6	175.3	185.39	192.153	191.711	186.37	182.8	188.174	198.644	210.516	219.835
13	164.0	169.5	178.9	188.971	196.115	196.419	190.458	187.361	192.079	202.151			
14	172	181	191.146	198.528	199.238	193.435	194.351	204.231	215.995				

Ru/Cr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	182.0	191.9	203.7	213.5	216.3	208.7	200.9	203.7	214.2	227.8	240.4	246.7	238.9
1	138.996	150.8	160.6	163.4	155.9	148.1	150.8	161.3	174.8	367.4	373.7	386.1	171.8
2	152.0	161.9	165.0	158.0	150.2	152.6	162.7	176.0	188.6	195.1	188.2	174.2	173.5
3	164.7	168.5	162.4	154.6	156.2	165.7	176.4	191.2	198.2	192.6	179.1	177.3	187.0
4	173.1	168.2	160.3	161.0	169.8	182.3	194.8	202.4	198.4	185.4	182.4	191.1	
5	173.6	165.8	165.6	173.7	185.3	198.3	206.4	203.8	191.4	187.3	195.0	208.5	
6	169.5	168.7	174.3	188.3	200.701	209.2	207.5	195.5	195.5				
7	169.8	177.3	189.2	201.7	210.3	208.9	197.0	191.8					
8	177.3	189.252	201.7	210.4	209.0								
9	189.621	202.003											
10	203.604												
11	215.695												
12	221.344												
13													
14													

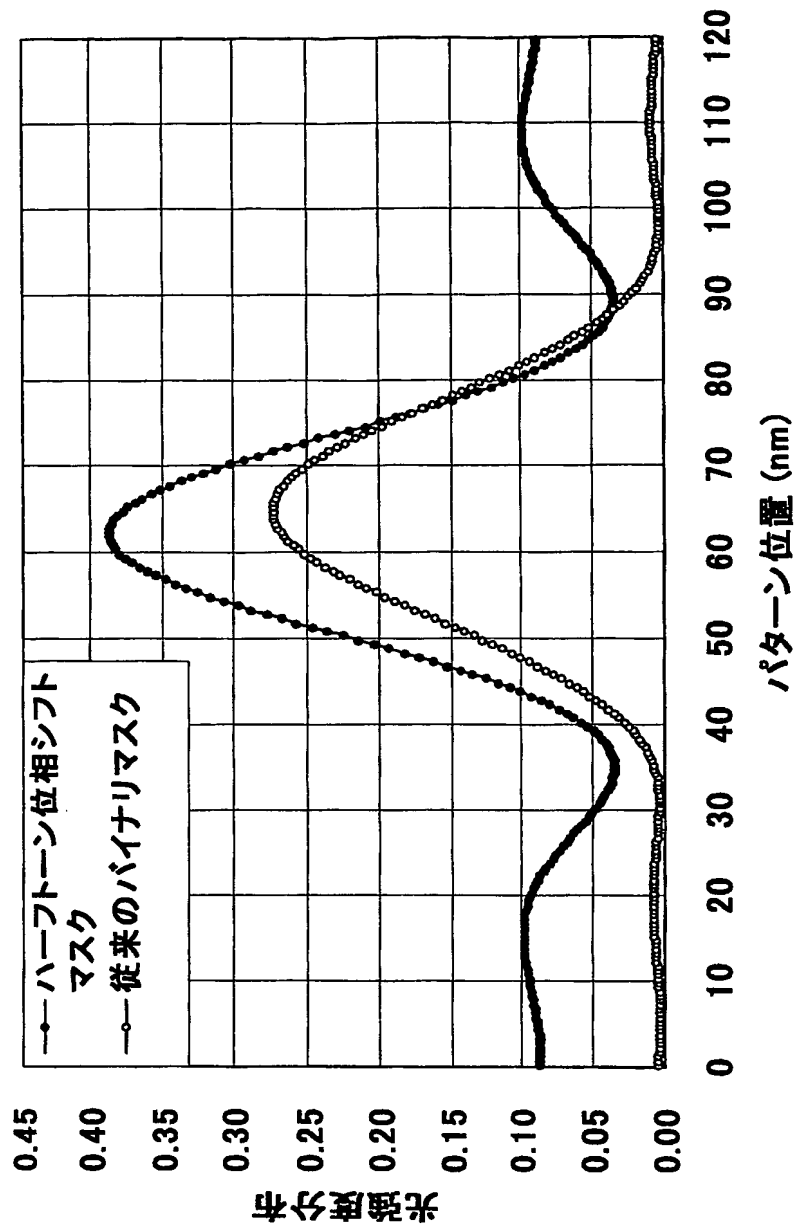
【図 11】

ハーフトーン反射率 4-6%

Ru/Cr	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
0						12.9	12.9	13.0	11.1	8.3	6.0	5.3	8.2
1										6.0	5.3	6.3	7.8
2											8.52266	8.06266	8.7
3												8.5	9.2
4										8.9	9.8	9.1	7.1
5									2.8	10.3	9.7	7.6	5.3
6								9.4	10.5	10.0	8.0	5.5	4.0
7						9.32535	10.5	10.0	8.0	5.6	4.0	4.0	4.0
8						9.3	10.4	10.0	8.0	5.6	4.0	4.0	5.2
9			6.0	7.9	9.5	10.7	10.2	8.2	5.8	4.1	4.1	5.4	6.6
10		8.1	8.4	10.1	11.3	10.9	8.8	6.3	4.5	4.4	5.6	6.9	7.2
11	9.0	9.1	10.7	12.0	11.7	9.7	7.0	5.0	4.8	6.0	7.4	7.7	8.5
12	9.7	11.3	12.7	12.5	10.5	7.7	5.6	5.1	6.2	7.7	8.2	7.1	5.1
13	11.6	13.1	13.0	11.1	8.3	6.0	5.3	6.4	7.9	8.4			
14	13.1	13.1	11.3	8.4	6.1	5.3	7.8	8.5	7.6				

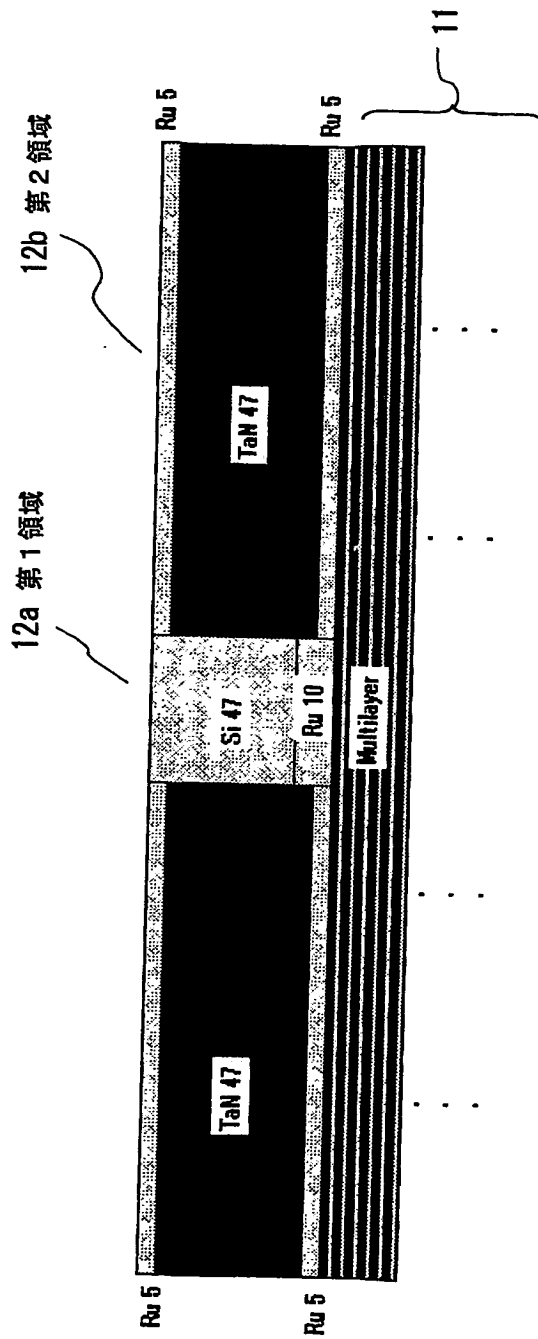
Ru/Cr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	7.7	8.4	7.5	5.5	3.6	2.7	3.3	4.5	5.4	5.1	3.8	2.3	1.4
1	8.4	7.5	5.6	3.6	2.8	3.3	4.5	5.4	5.1	3.9	2.3	1.4	1.6
2	7.9	5.9	3.9	2.9	3.4	4.7	5.6	5.3	4.1	2.5	1.5	1.7	2.8
3	6.4	4.3	3.2	3.6	4.9	5.2	5.7	4.4	2.8	1.7	1.8	2.7	3.7
4	4.8	3.5	3.8	5.1	6.2	6.1	4.8	3.1	1.9	1.9	2.8	3.8	
5	3.8	4.0	5.2	6.4	6.4	6.2	3.4	2.1	2.0	2.8	3.9	4.3	
6	4.0	5.3	6.5	6.6	5.4	3.6	2.2	2.0					
7	5.2	6.5	6.6	5.5	3.7	2.3	2.0	2.8					
8	6.5	6.6	5.5	3.7	2.3								
9	6.8	5.6											
10	6.0												
11	4.5986												
12	3.3												
13													
14													

【図12】

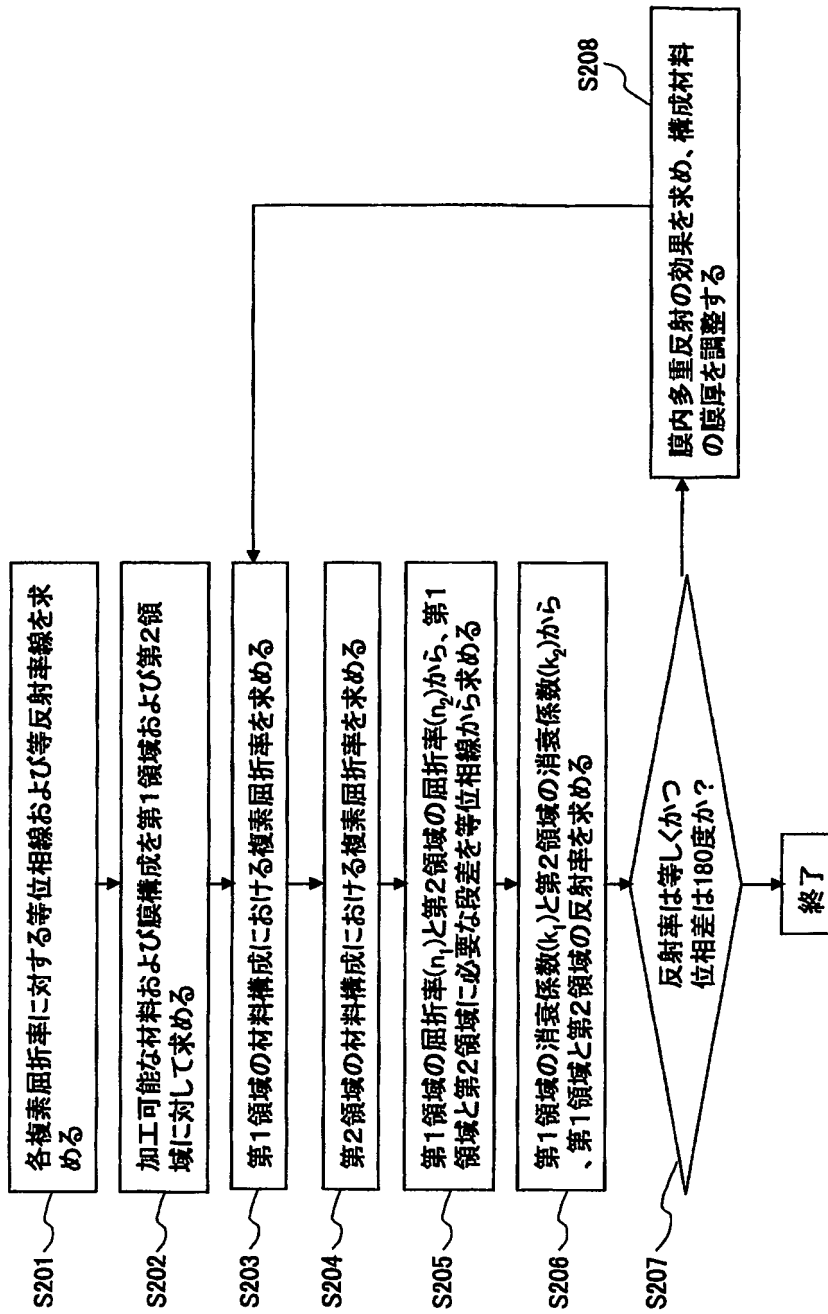


【図 13】

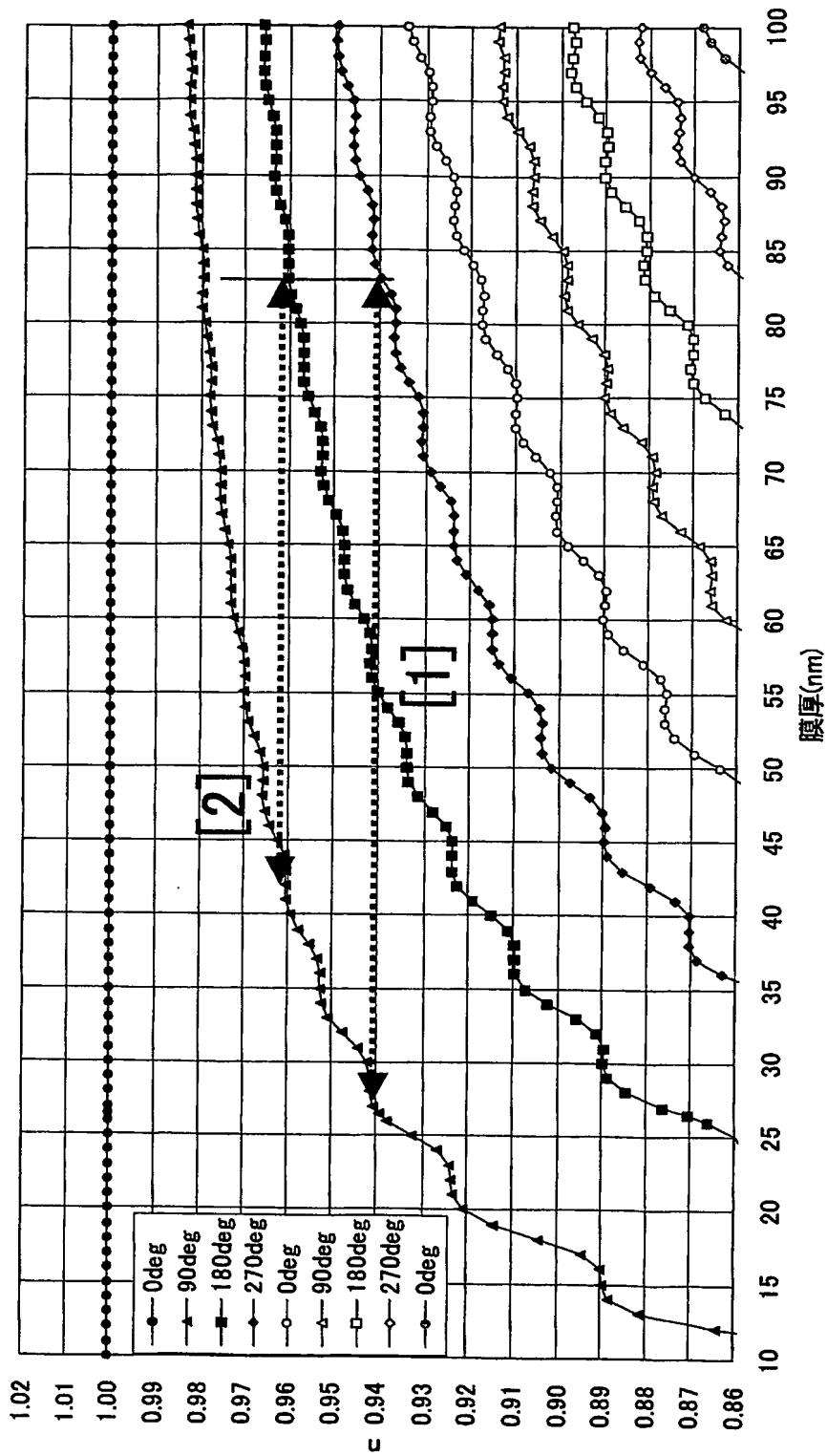
ハーフトーン位相シフトマスク フラット構造



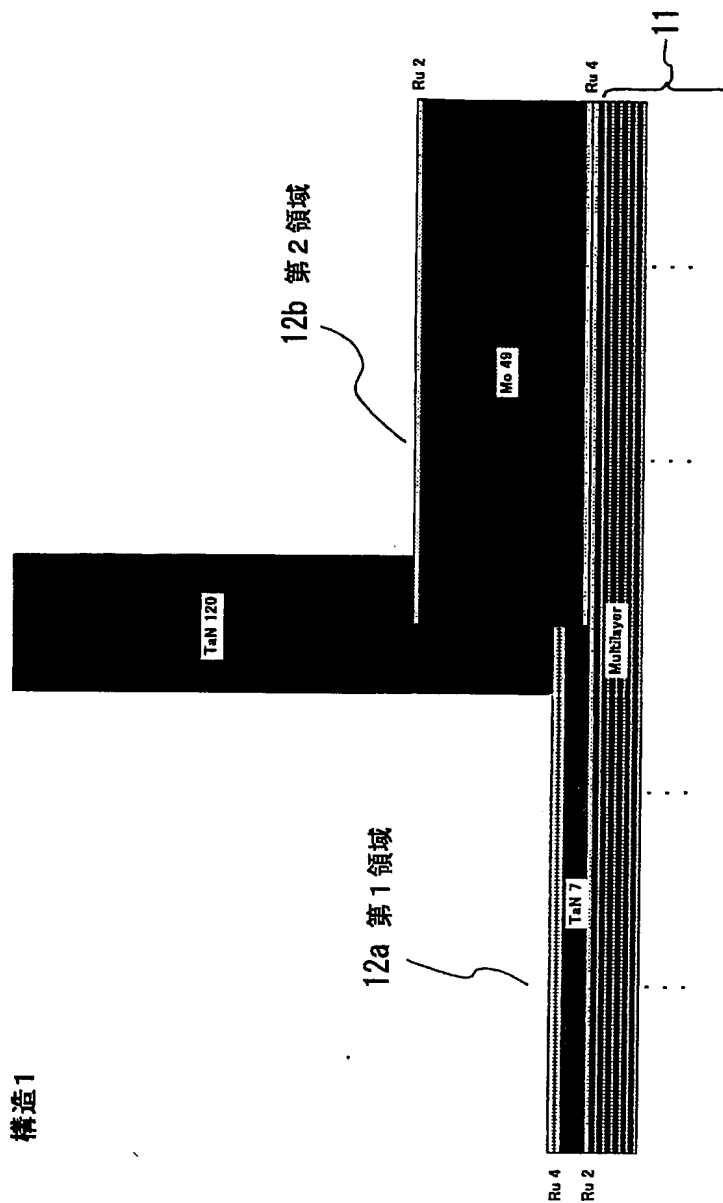
【図 14】



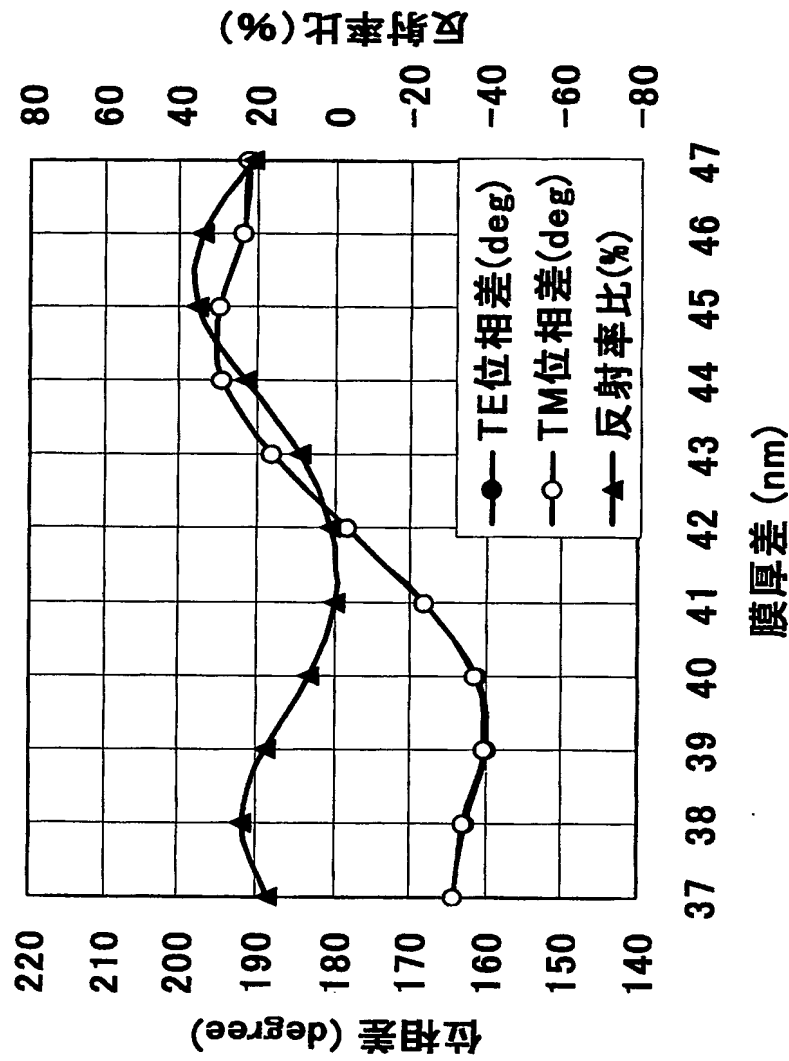
【図 15】



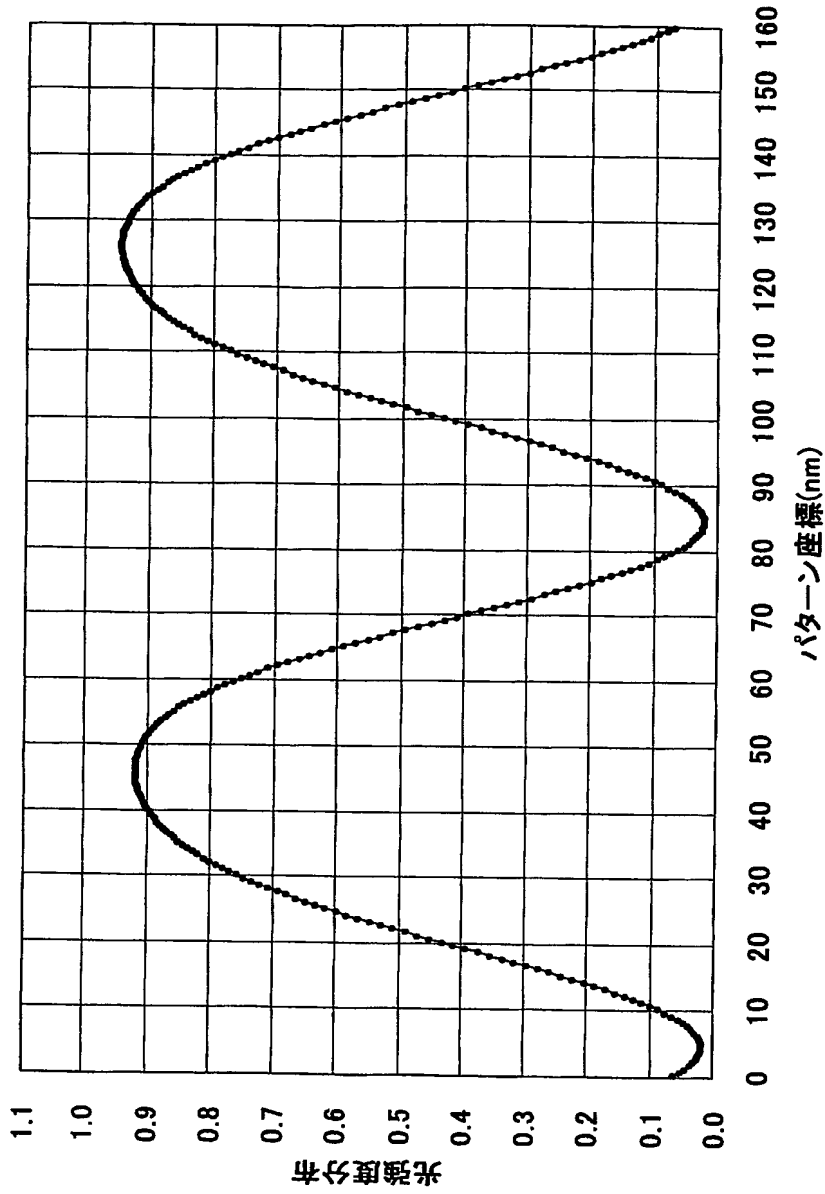
【図 16】



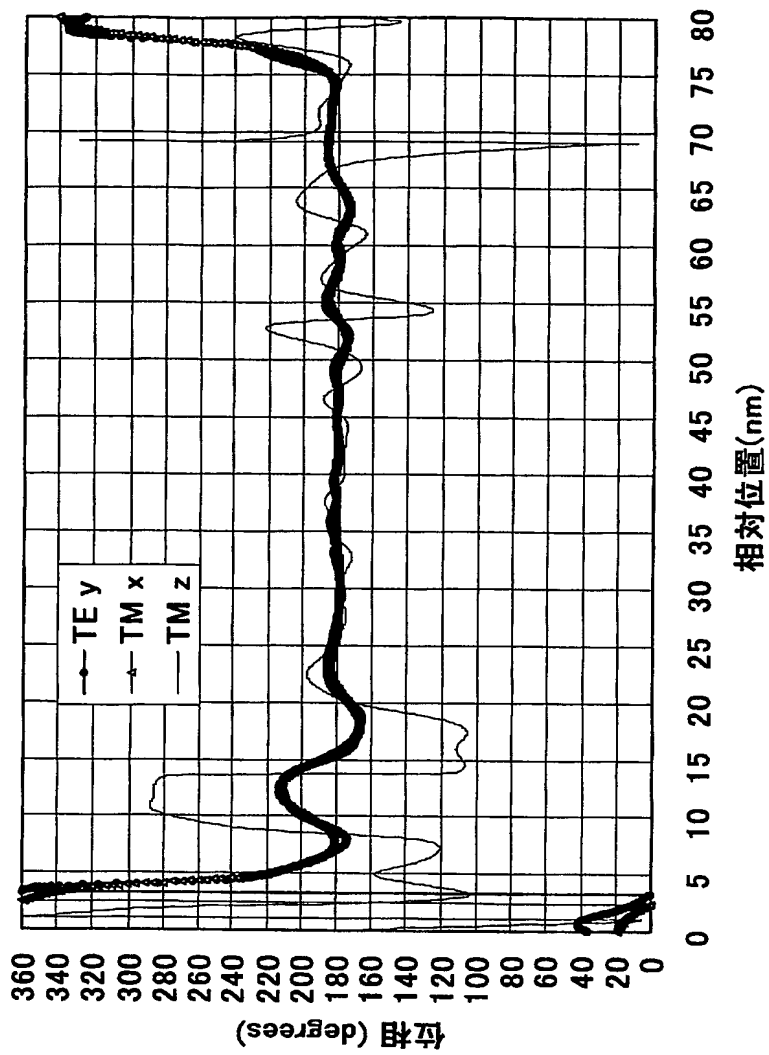
【図 17】



【図 18】



【図 19】



【図 20】



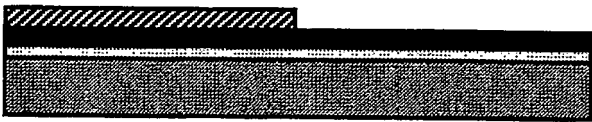
工程1 Ruコート



工程2 TaNコート



工程3 レジストコート



工程4レジストパターニング



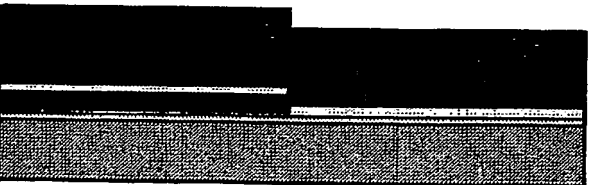
工程5 TaNエッチング



工程6 レジスト剥離

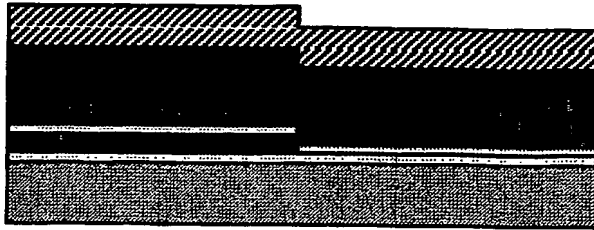


工程7 Ruコート

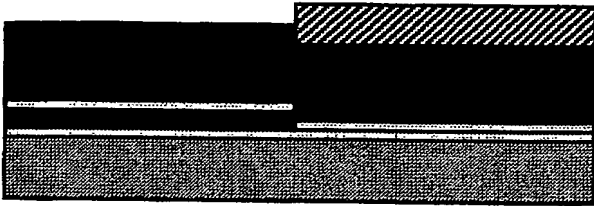


工程8 Moコート

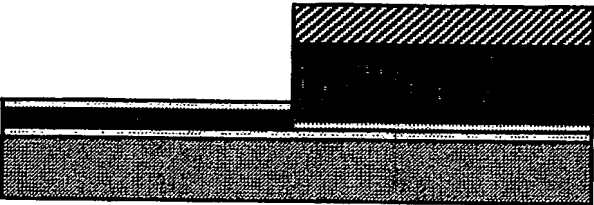
【図 21】



工程9 レジストコート



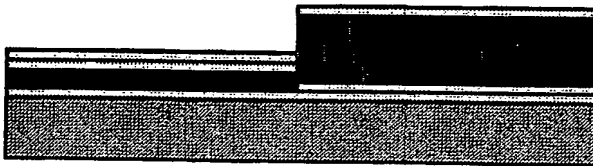
工程10 レジストパターニング



工程11 Moエッチング

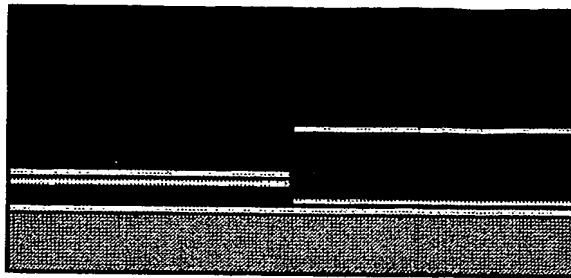


工程12 レジスト剥離

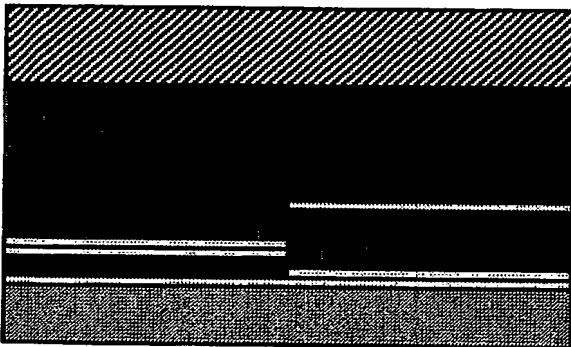


工程13 Ruコート

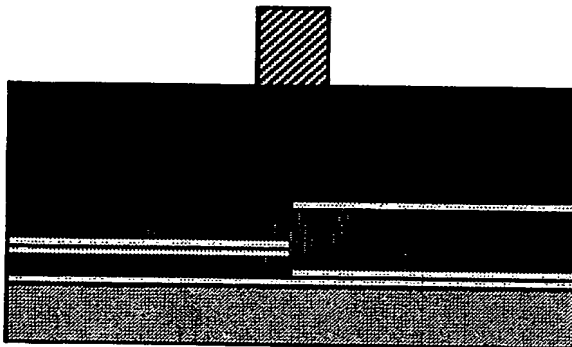
【図 22】



工程14 TaNコート

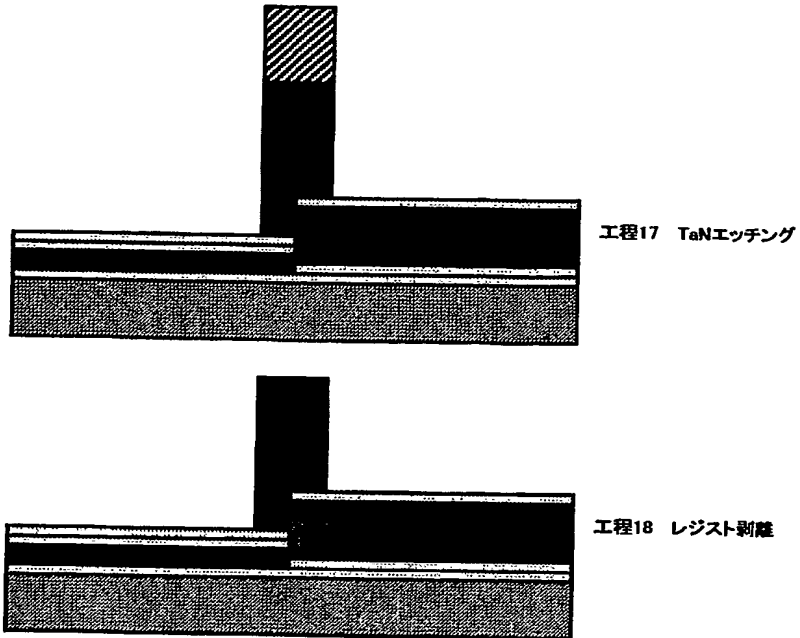


工程15 レジストコート

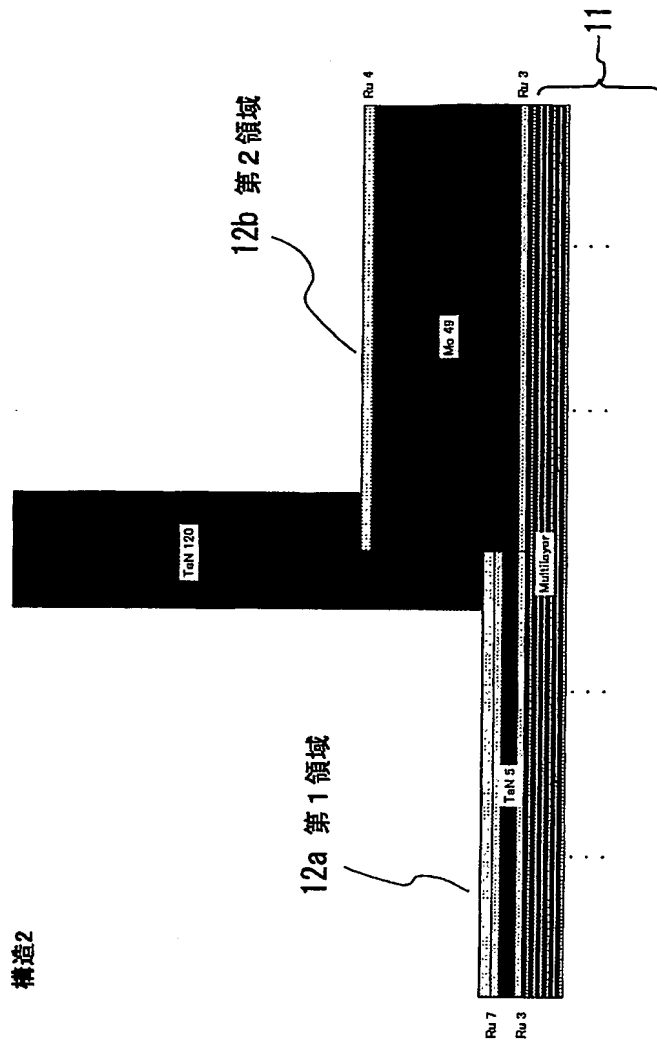


工程16 レジストパターニング

【図 23】

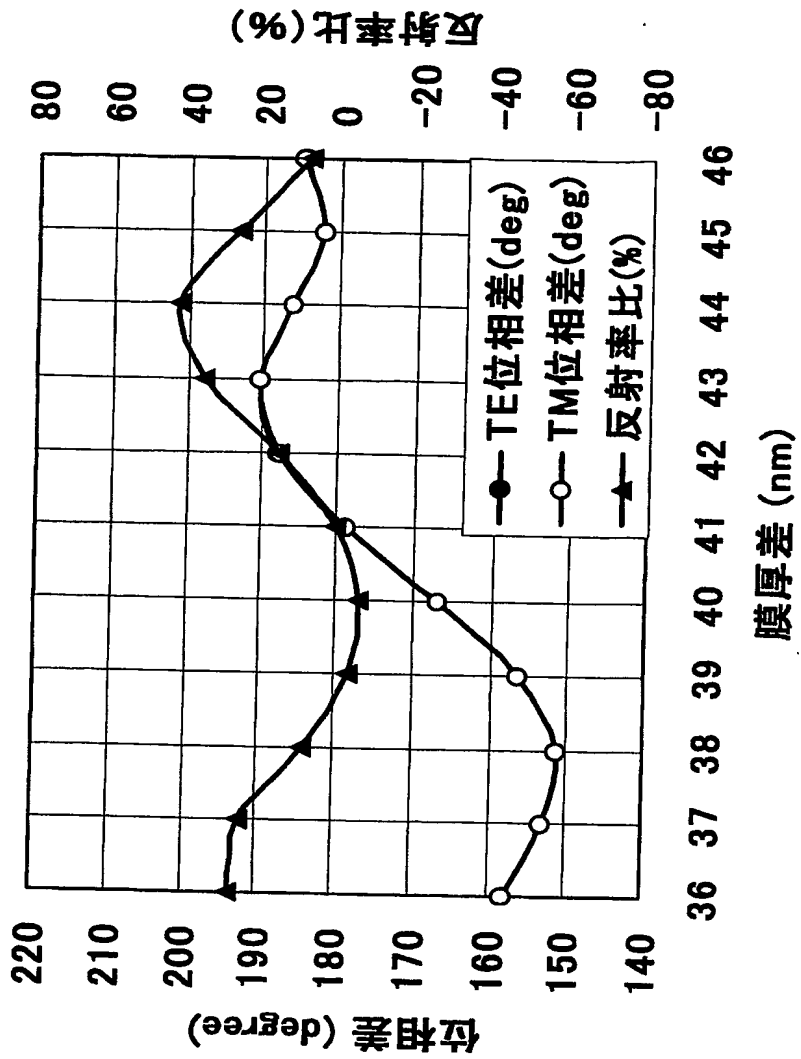


【図 24】

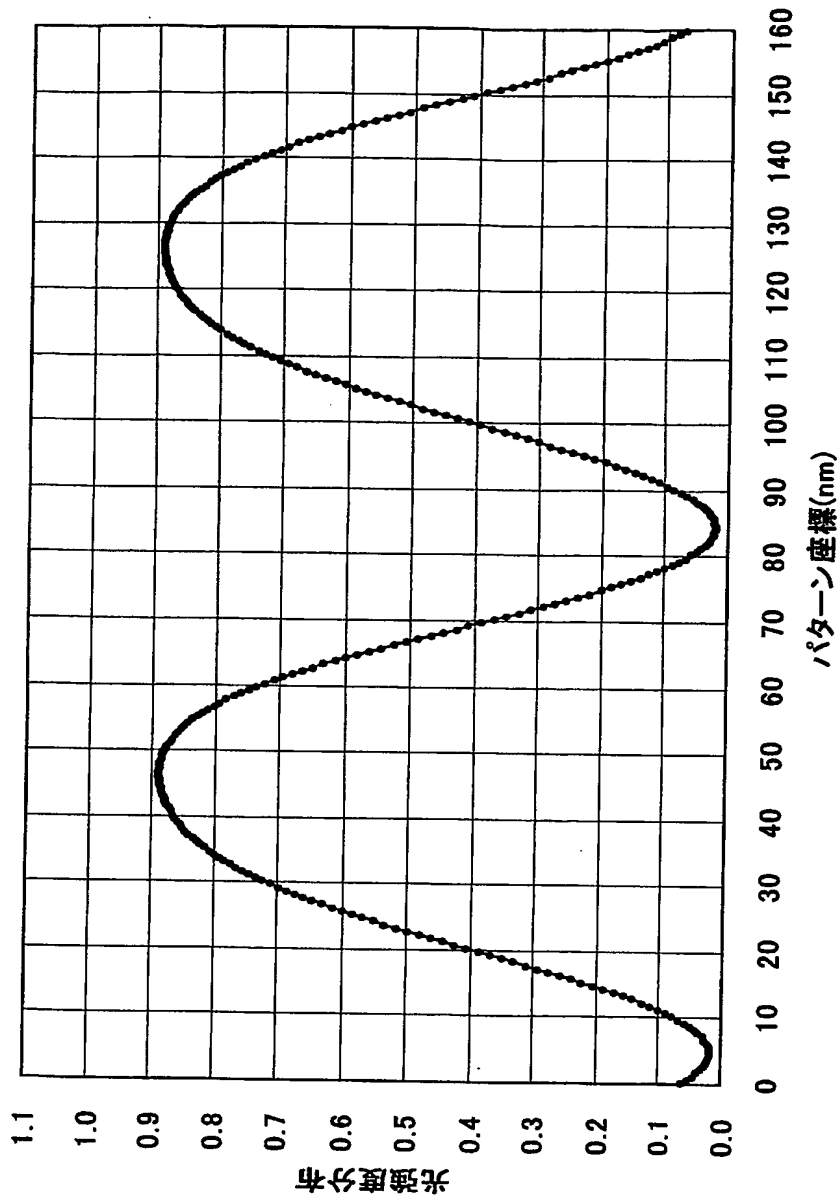


構造2

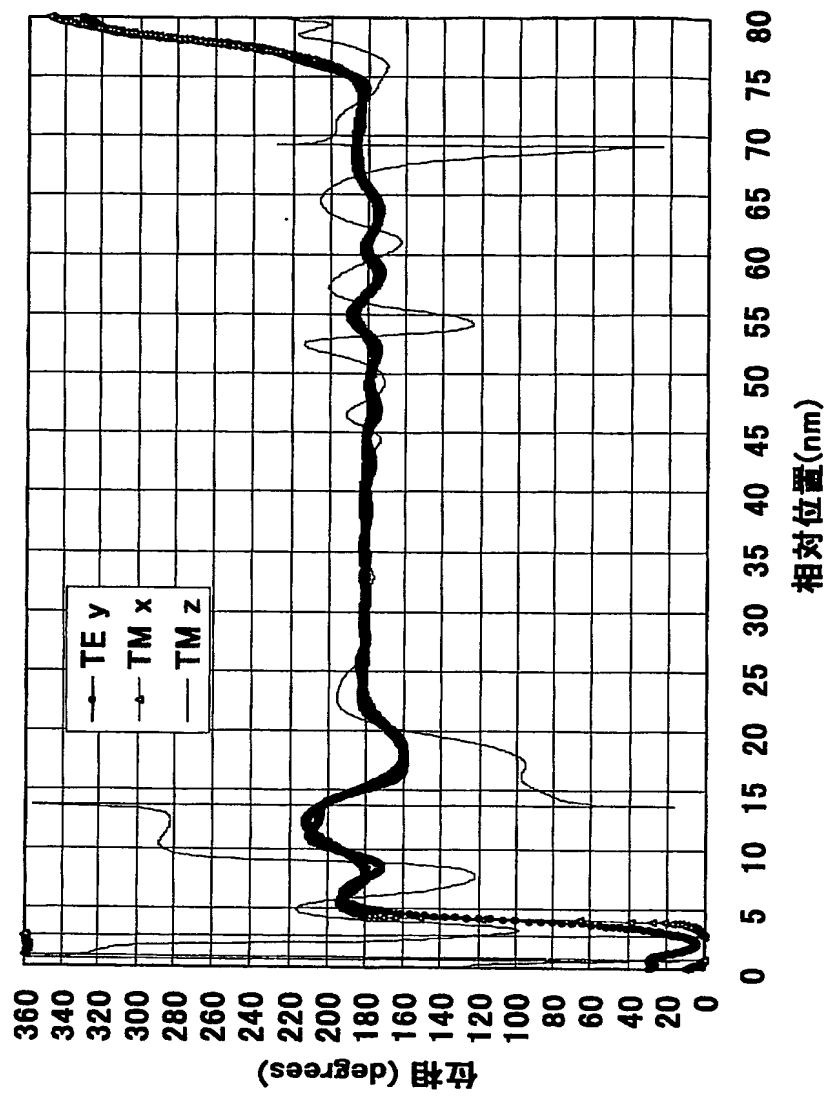
【図 25】



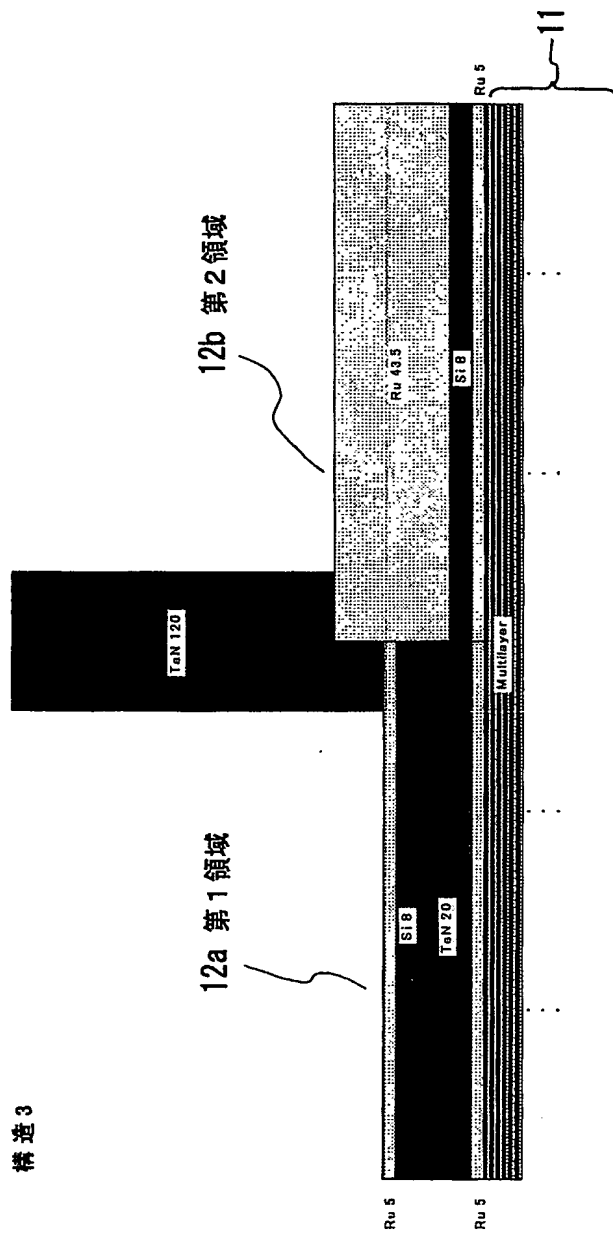
【図 26】



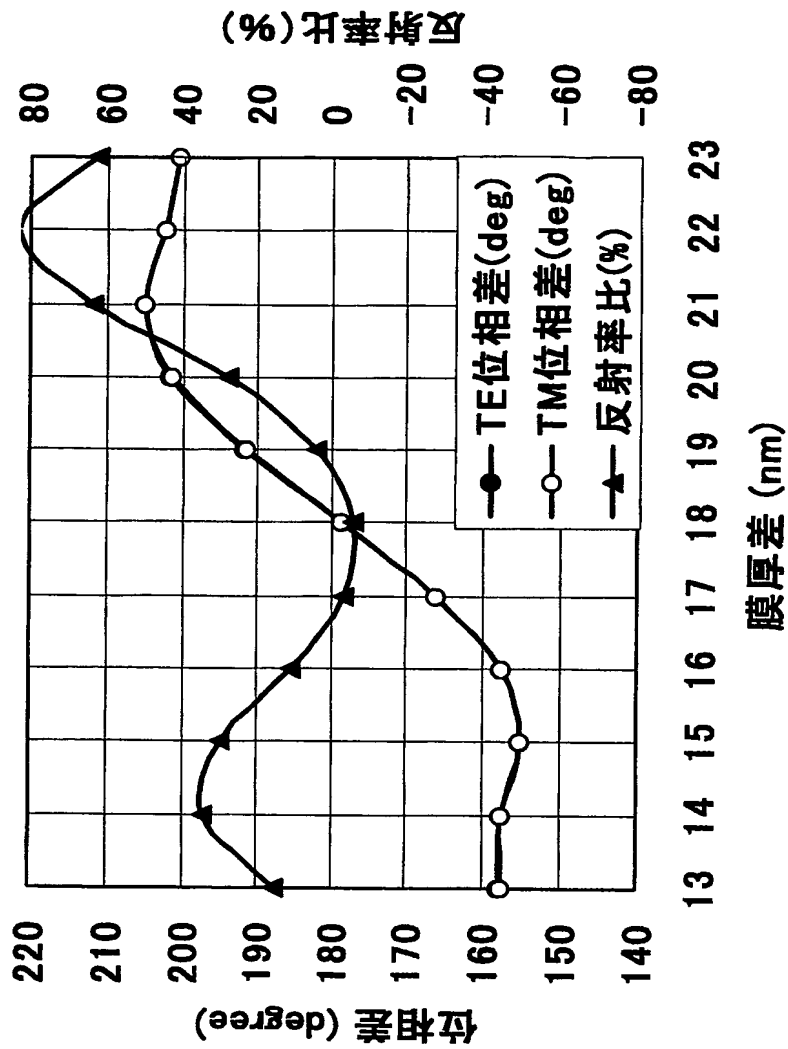
【図 27】



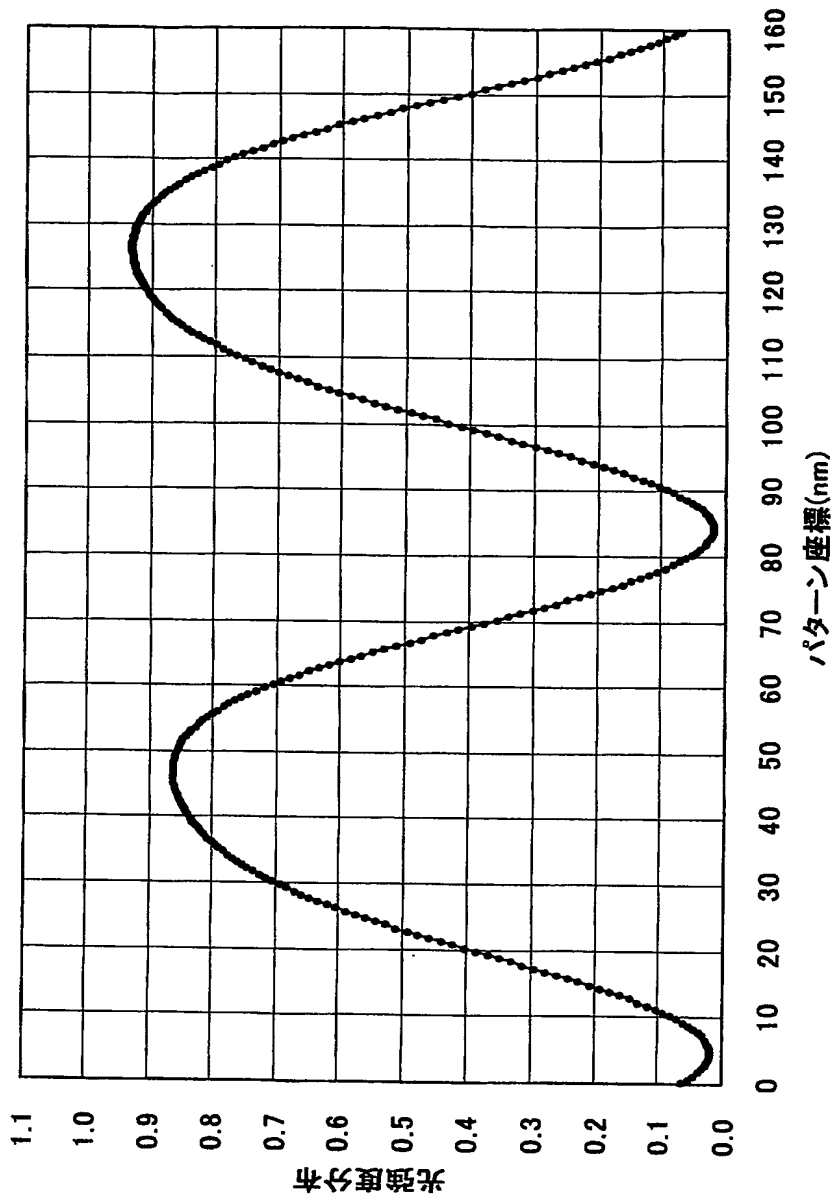
【図 28】



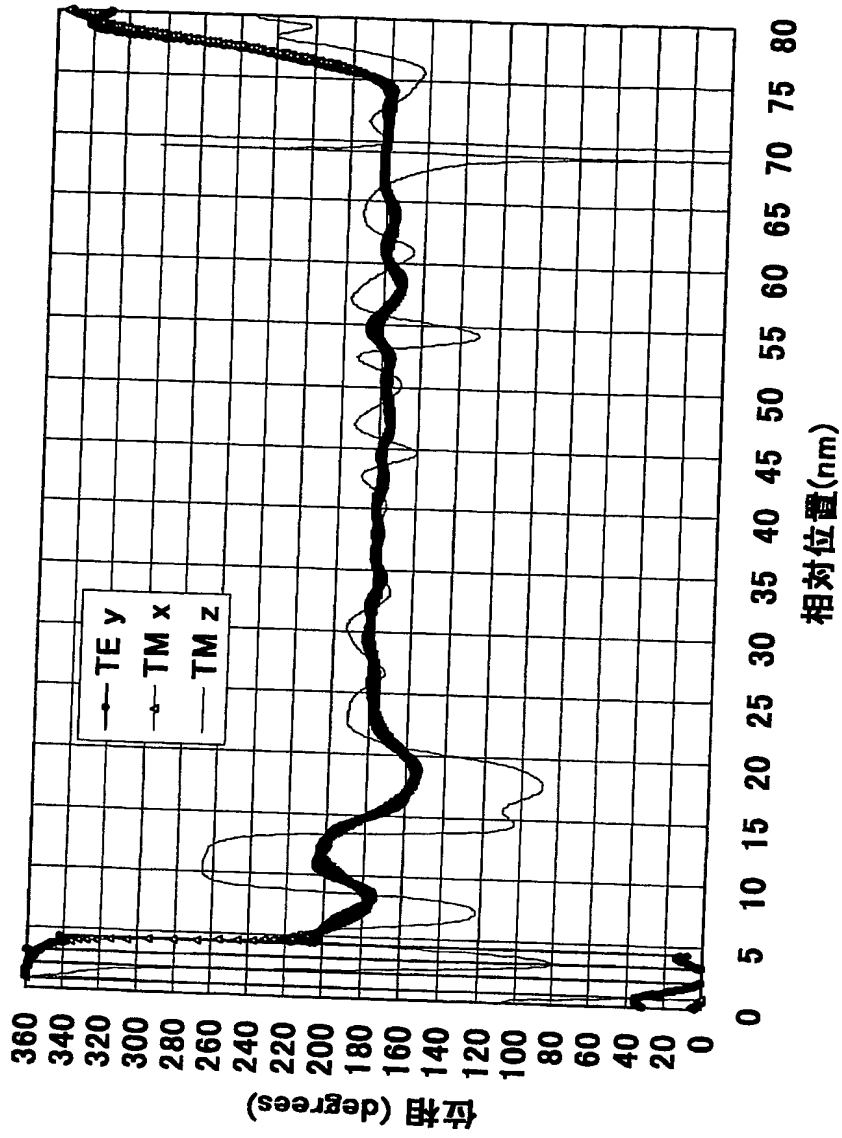
【図 29】



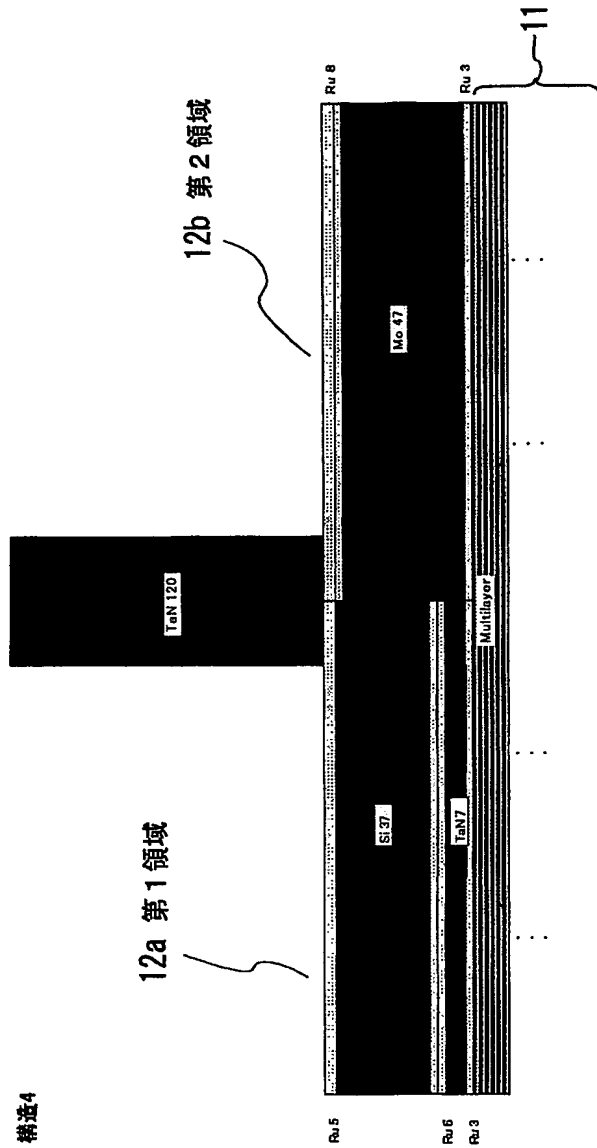
【図 30】



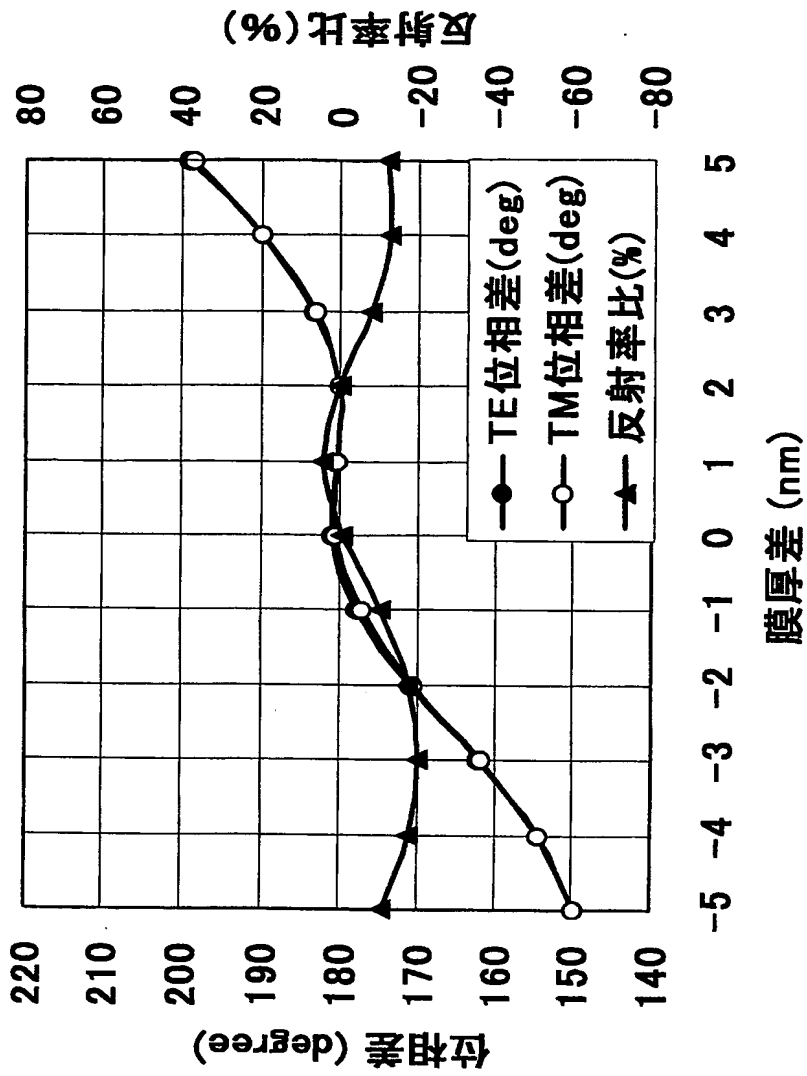
【図 31】



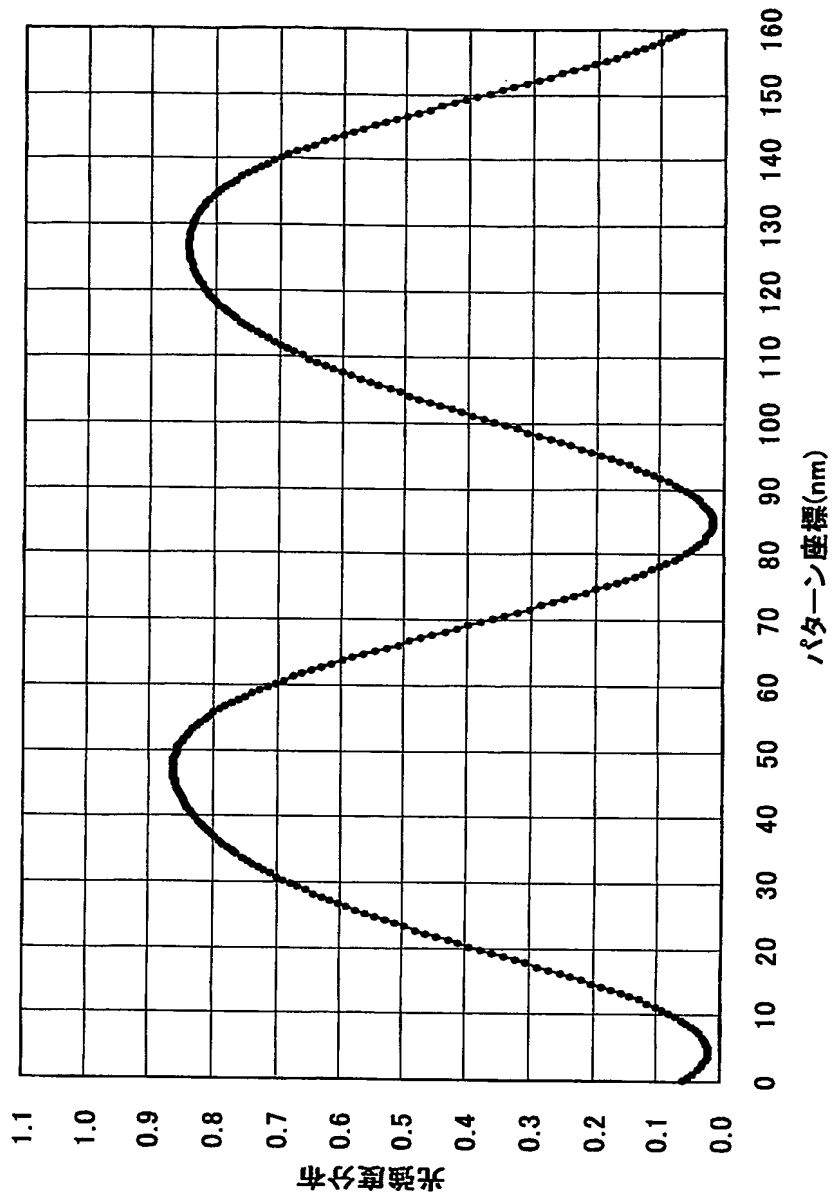
【図 3 2】



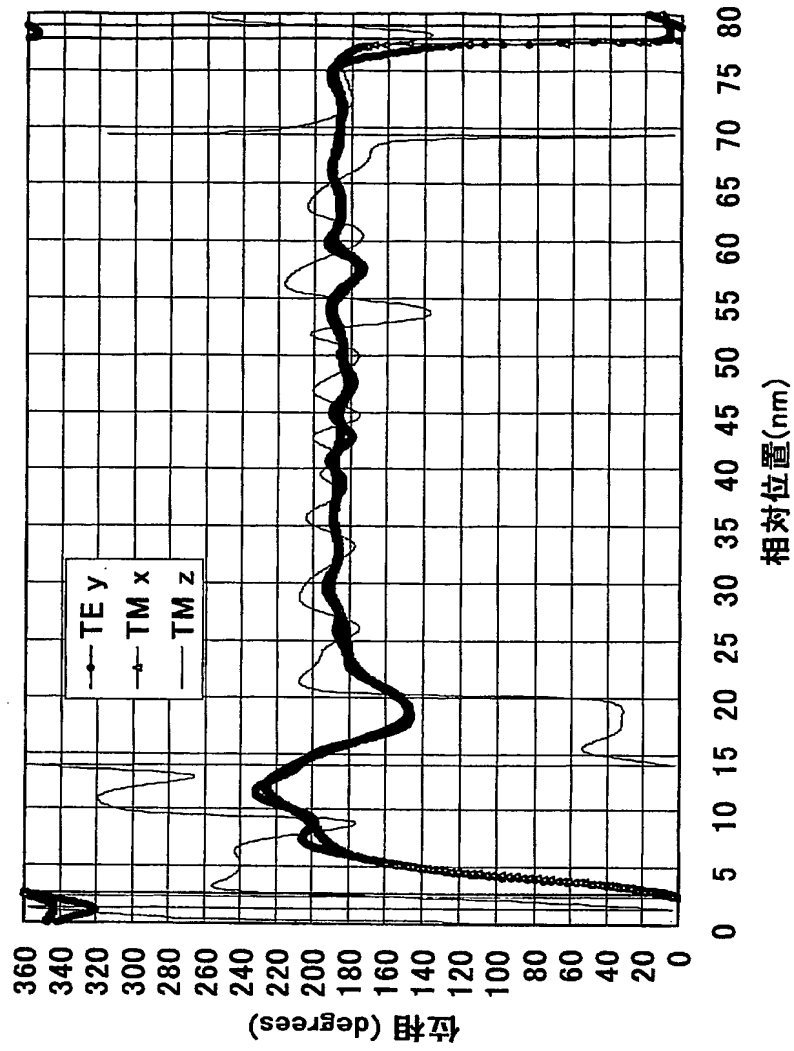
【図 33】



【図 34】



【図 35】



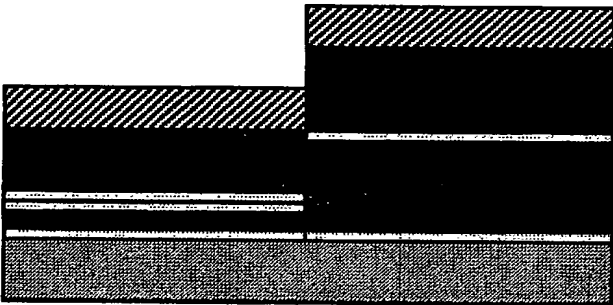
【図 36】



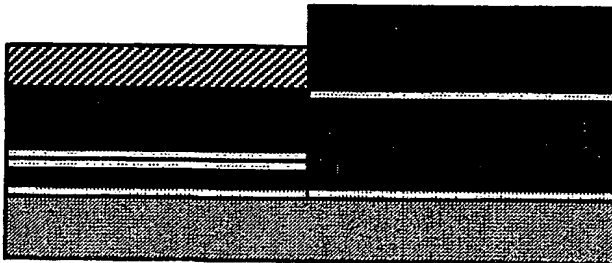
工程13 Ruコート



工程13-1
Siコート

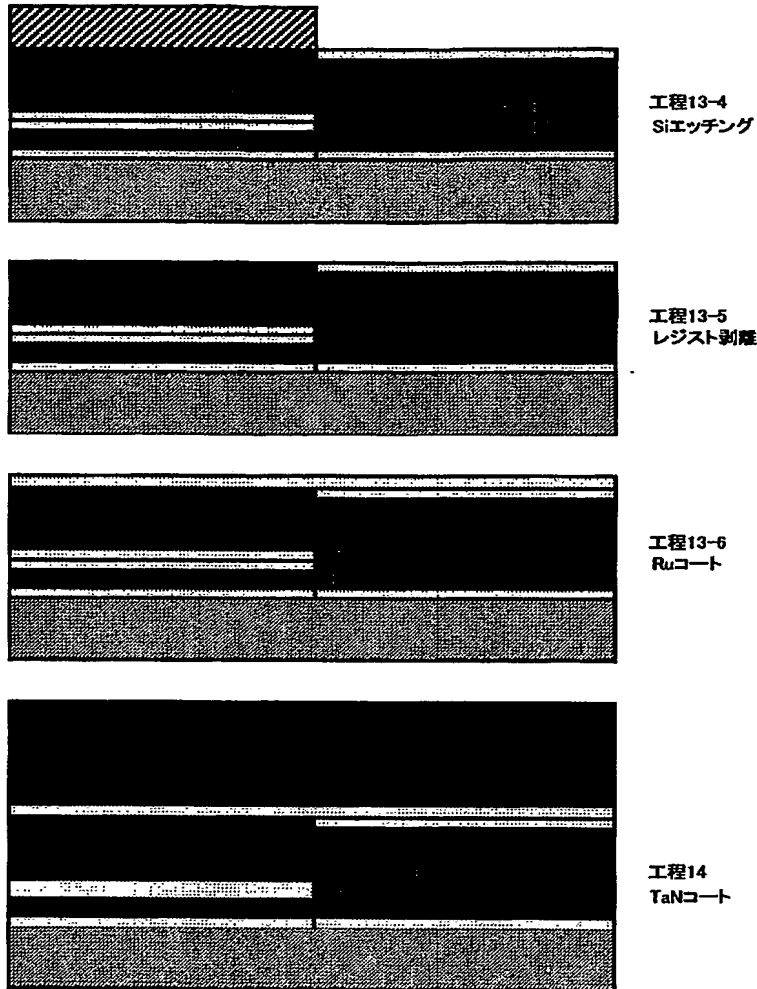


工程13-2
レジストコート

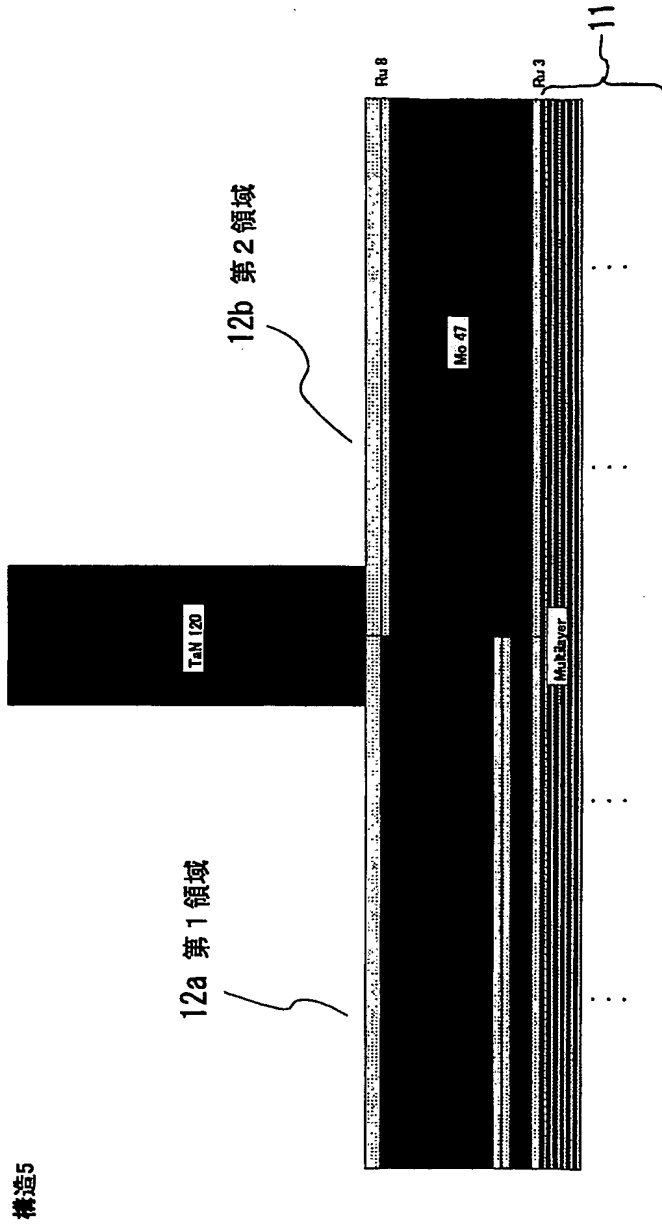


工程13-3
レジストパターニング

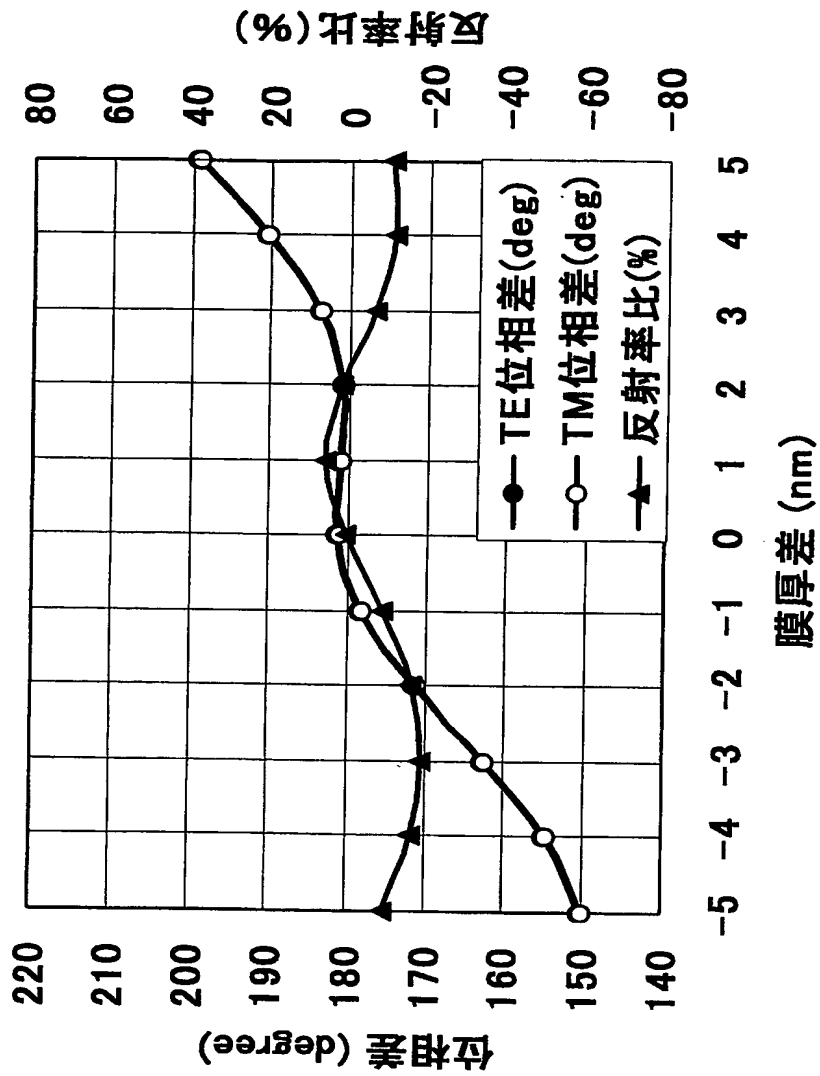
【図 37】



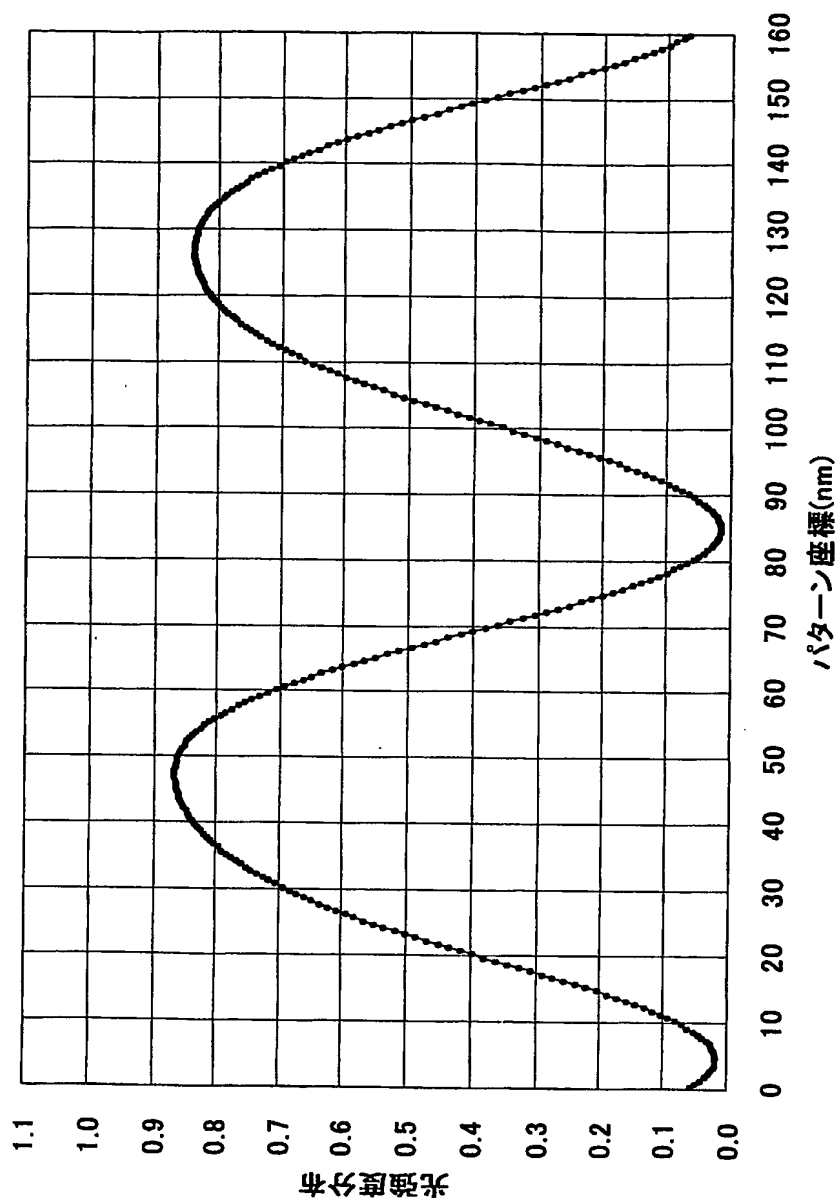
【図 38】



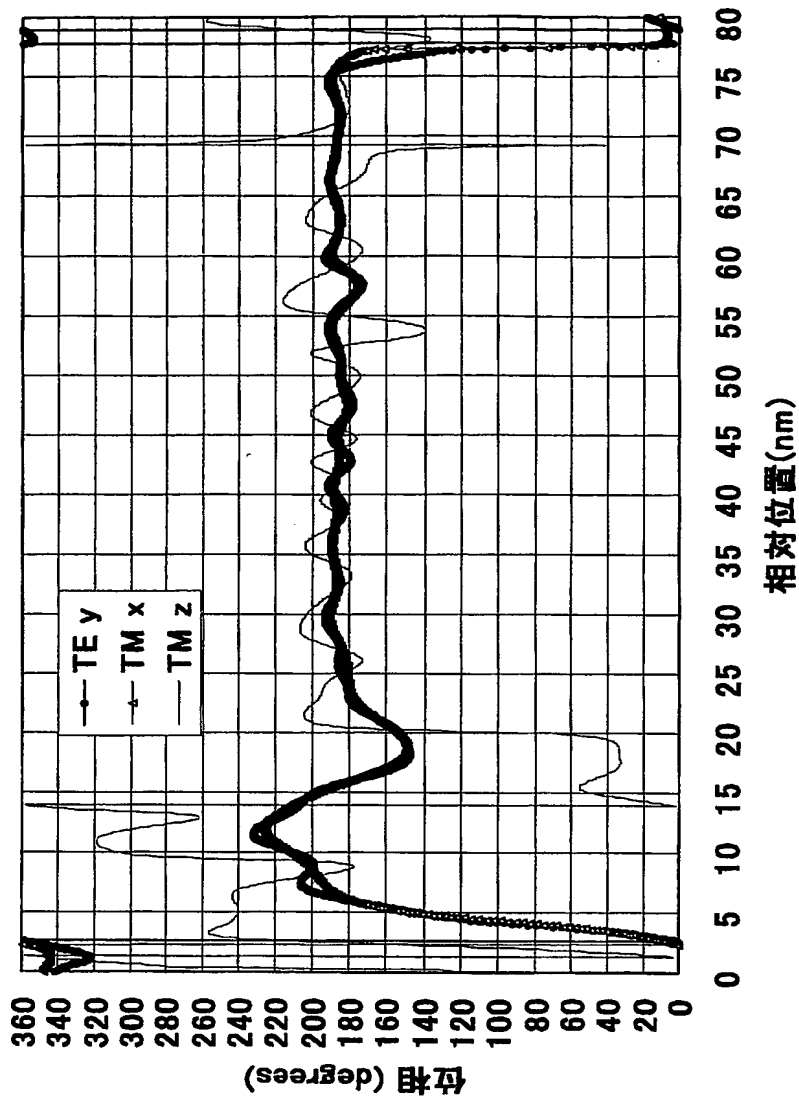
【図 39】



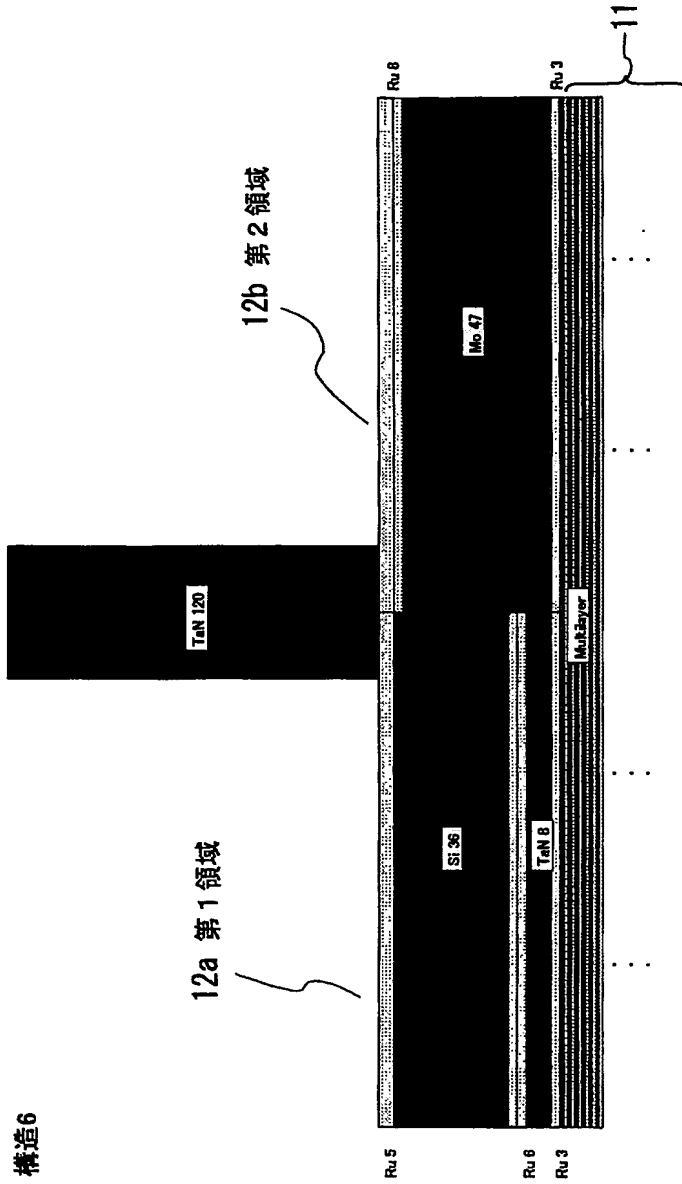
【図 40】



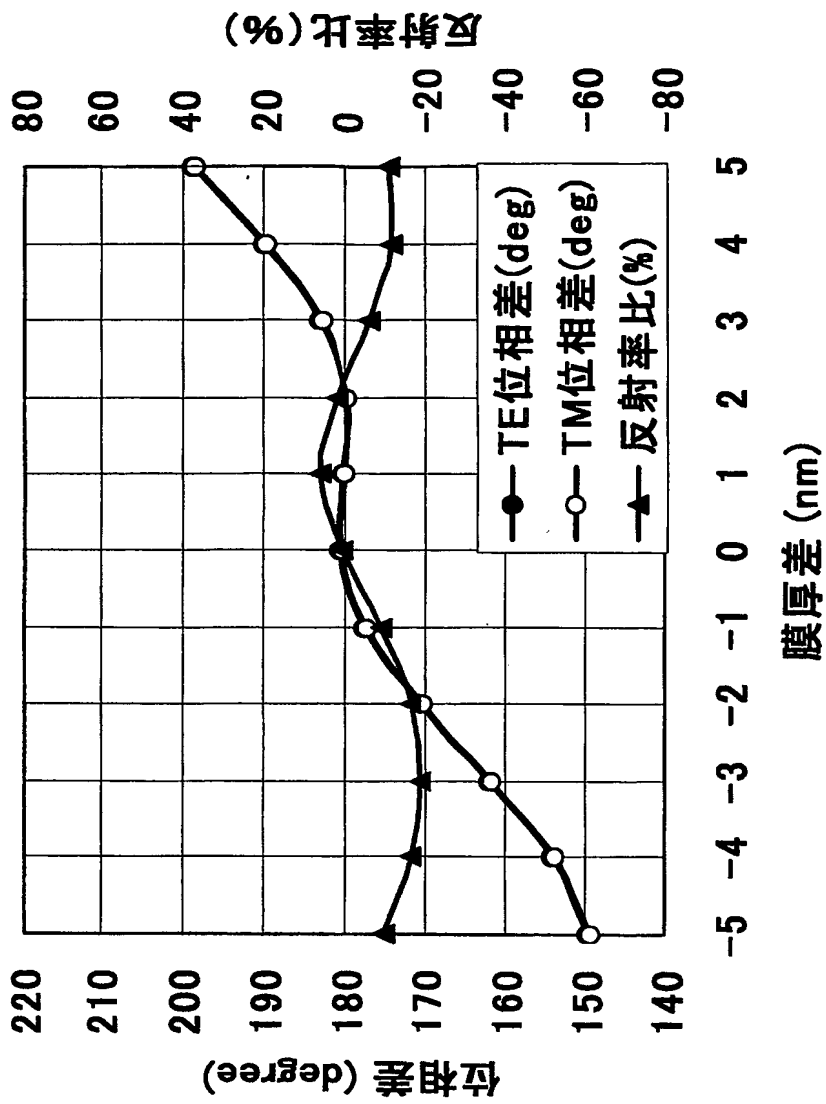
【図 4 1】



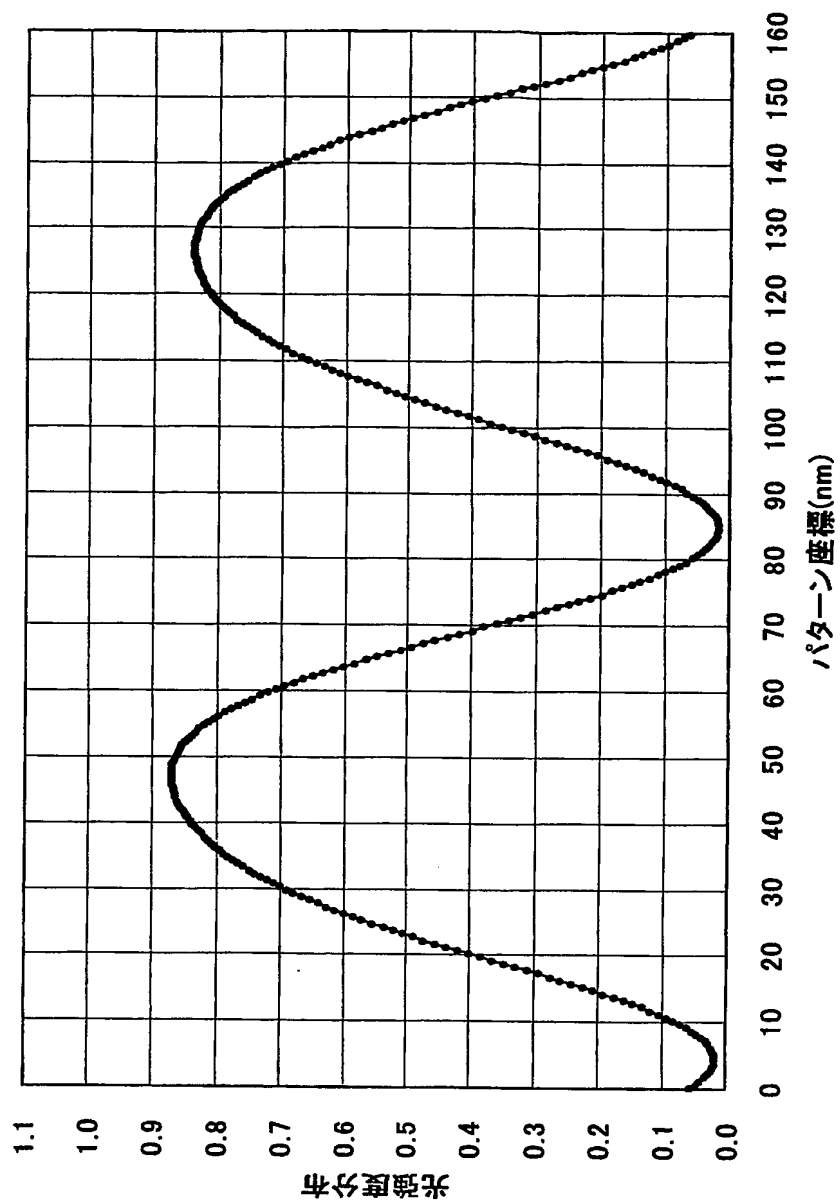
【図 4 2】



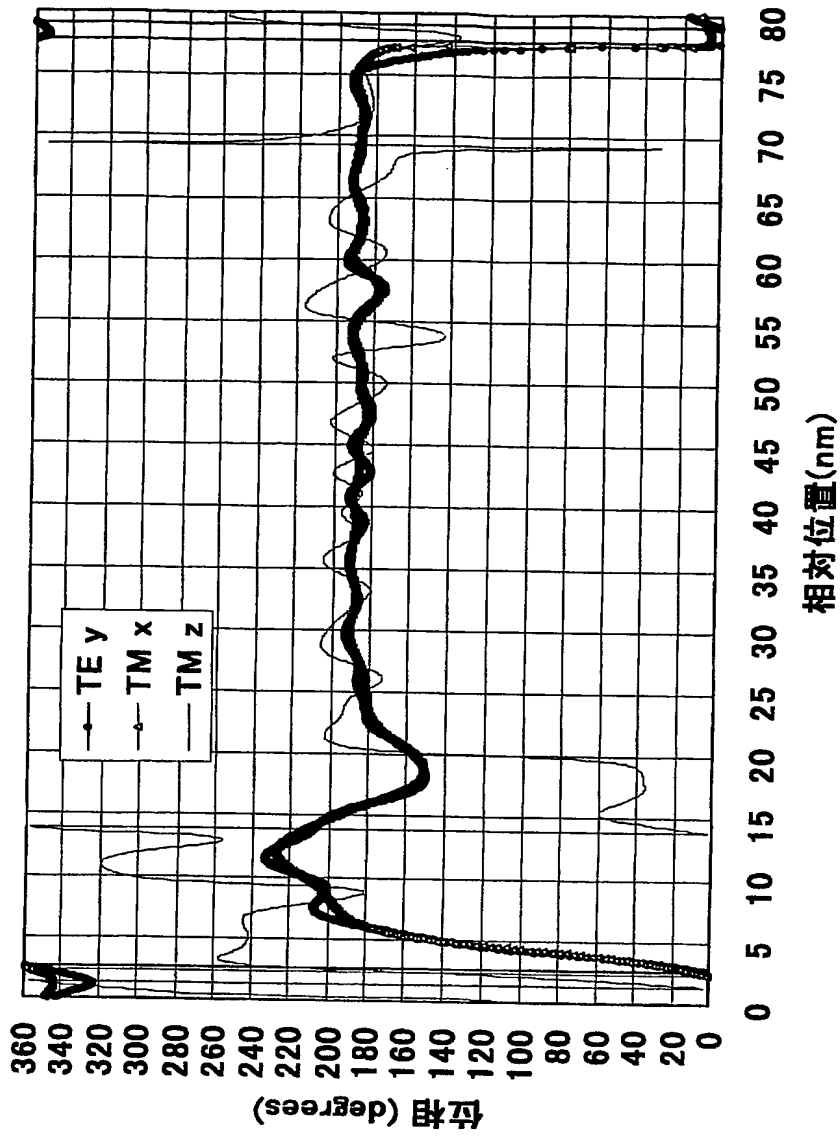
【図 43】



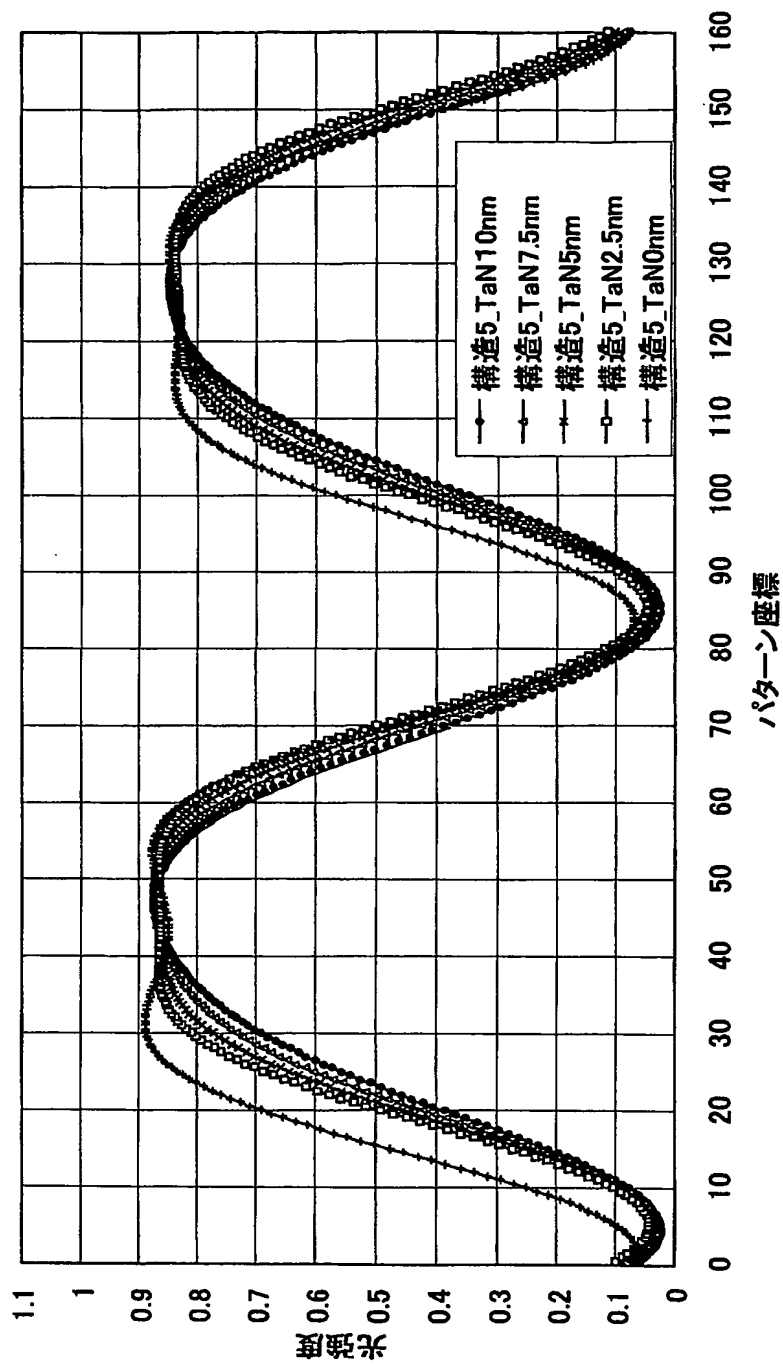
【図 4 4】



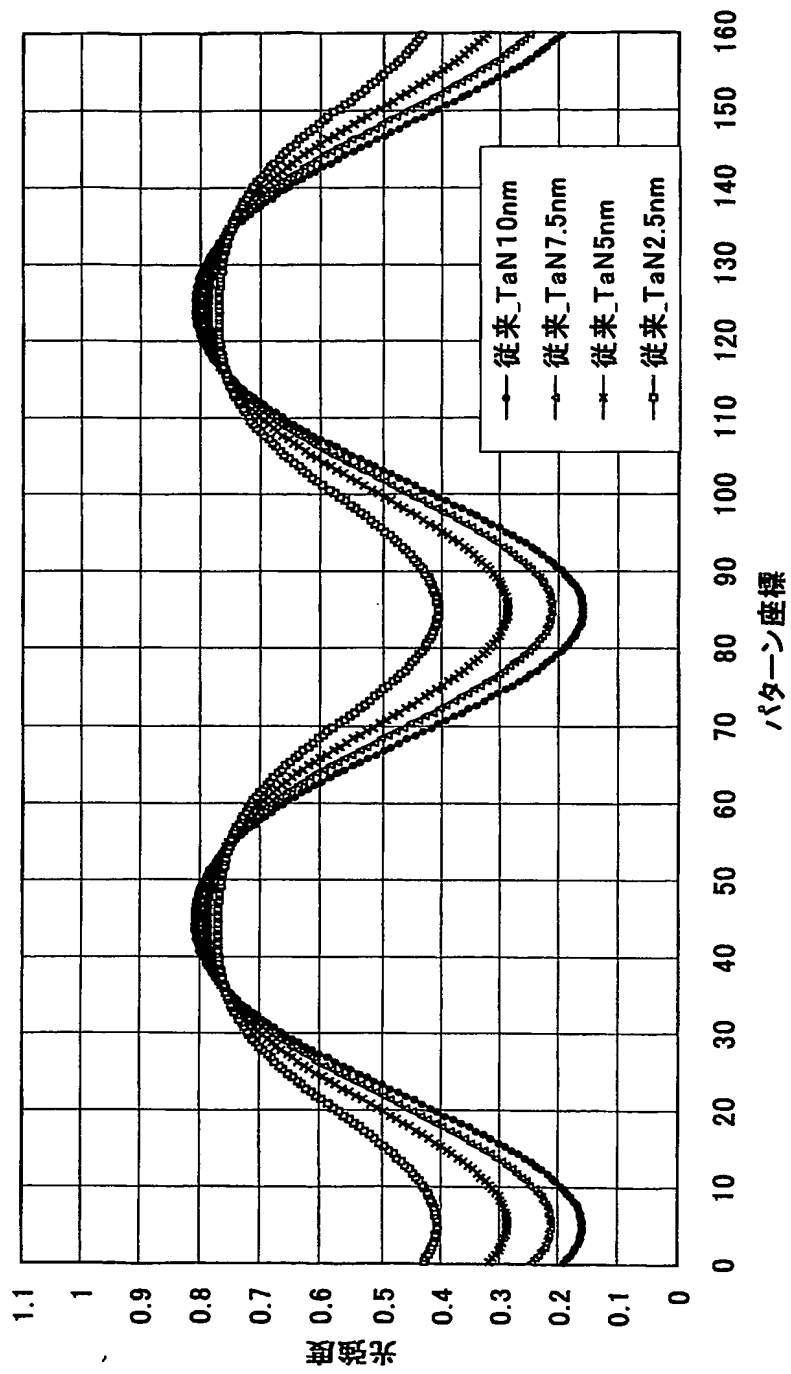
【図 45】



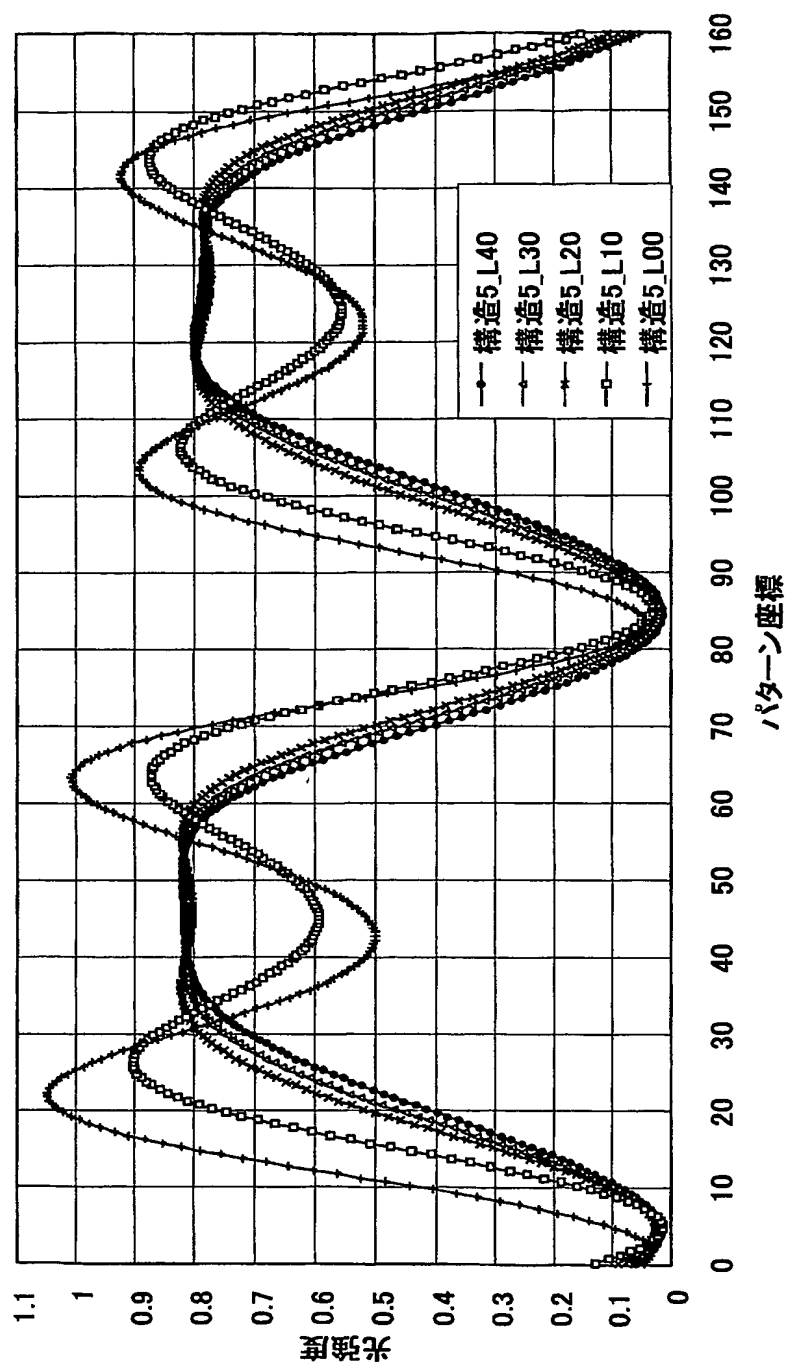
【図 46】



【図 47】



【図 48】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 極短紫外光を反射する場合であっても、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、現実構成することのできる極短紫外光の位相シフトマスクを提供する。

【解決手段】 短紫外光を反射する反射多層膜基板 11 と、その反射多層膜基板 11 上に形成された第 1 領域 12 a および第 2 領域 12 b とを具備してなる位相シフトマスク 10 を構成するのにあたって、先ず、極短紫外光に対する任意の複素屈折率と膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定する。そして、その特定結果を基にして、第 1 領域 12 a での極短紫外光の反射光と第 2 領域 12 b での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、第 1 領域 12 a の形成膜および第 2 領域 12 b の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を設定する。

【選択図】 図 1

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2002-200777
受付番号	50201007384
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0094
作成日	平成 14 年 7 月 15 日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	000002185
【住所又は居所】	東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 35 号
【氏名又は名称】	ソニー株式会社

【代理人】

申請人	
【識別番号】	100086298
【住所又は居所】	神奈川県厚木市旭町 4 丁目 11 番 26 号 ジェン トビル 3 階 船橋特許事務所
【氏名又は名称】	船橋 國則

次頁無

特願 2002-200777

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[000002185]

1. 変更年月日

1990年 8月30日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都品川区北品川6丁目7番35号

氏 名

ソニー株式会社